



Vliv teploty při výrobě optických ploch

Diplomová práce

Studijní program: N2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2302T010 – Konstrukce strojů a zařízení
Autor práce: **Bc. Vladislav Kuryshv**
Vedoucí práce: Ing. Petra Dančová, Ph.D.





TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC
Faculty of Mechanical Engineering ■

The Influence of Temperature on the Manufacture of Optical Surfaces

Master thesis

Study programme: N2301 – Mechanical Engineering
Study branch: 2302T010 – Machine and Equipment Design
Author: **Bc. Vladislav Kuryshv**
Supervisor: Ing. Petra Dančová, Ph.D.





Zadání diplomové práce

Vliv teploty při výrobě optických ploch

Jméno a příjmení: **Bc. Vladislav Kuryshev**
Osobní číslo: S16000326
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Konstrukce strojů a zařízení
Zadávací katedra: Katedra energetických zařízení
Akademický rok: **2017/2018**

Zásady pro vypracování:

1. Popište technologii výroby optických ploch.
2. Popište princip měření a vyhodnocení optického povrchu.
3. Proveďte experimenty pro určení teplotního namáhání při tmelení čočky.
4. Vyhodnoťte získané výsledky.



Rozsah pracovní zprávy:

cca 50 stran

Forma zpracování práce:

tištěná



Seznam odborné literatury:

[1] ASKIN, Ronald G. a Charles R. STANDRIDGE. *Modeling and analysis of manufacturing systems*. New York: Wiley, 1993. ISBN 9780471514183.

[2] MALACARA, Daniel, ed. *Handbook of optical engineering*. Second edition. Boca Raton: Taylor & Francis, CRC Press, 2018. Optical science and engineering. ISBN 9781498720793.

[3] DRIGGERS, Ronald G., ed., *Encyclopedia of optical engineering*. New York: Dekker, 2003. ISBN 9780824709402.

Vedoucí práce:

Ing. Petra Dančová, Ph.D.
Katedra energetických zařízení

Konzultant práce:

prof. Ing. Tomáš Vít, Ph.D.
Katedra energetických zařízení

Datum zadání práce:

1. února 2018

Předpokládaný termín odevzdání:

1. srpna 2019

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan

V Liberci 28. února 2018



doc. Ing. Václav Dvořák, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že texty tištěné verze práce a elektronické verze práce vložené do IS STAG se shodují.



23. 4. 2019

Bc. Vladislav Kuryshev

Poděkování

Chtěl bych vyjádřit poděkování lidem, kteří mi pomohli s vytvořením této práce a bez kterých by tuto práci nebylo možné dokončit. V první řadě děkuji Ing. Petře Dančové Ph.D. za odborné vedení, věcné a vstřícné konzultace během vypracování této práce. Děkuji prof. Ing. Tomáši Vítovi Ph.D. za cenné rady v oblasti přenosu tepla a hmoty a poskytnutí pomoci se simulací.

V neposlední řadě chci poděkovat své ženě Dianě a dceři Tee za trpělivost a podporu při psaní práce.

Tato práce vznikla na Technické univerzitě v Liberci a ve spolupráci se společností Asphericon.

Abstrakt

Tato diplomová práce je zaměřená na zkoumání vlivu teploty při výrobě optických ploch. V této práci je popsána technologie výroby čoček, jsou uvedeny principy měření optických povrchů. Je proveden experiment zaměřený na experimentální určení teplotního namáhání při tmelení čočky. Je zkoumán vliv různých typů tmelek na změnu tvaru povrchu čočky při tepelném namáhání. Měření zkoumaných optických povrchů je provedeno na Fizeau interferometru. Pro porovnání výsledků z experimentů je provedena numerická simulace v softwaru MSC.Marc/Mentat.

Klíčová slova: optická výroba, tmelení čoček, deformace, teplotní namáhání, Fizeau interferometr, numerická simulace.

Abstract

This thesis is based on the research of temperature influence on the optical surfaces manufacture. The technology of manufacturing lenses is described, and the measurement principles of optical surfaces are also presented in this work. The experiment is aimed at the experimental determination of the thermal stress during lens cementing. The influence of different types of holders on the change in the shape of the lens surface under thermal stress is investigated. Measurement of the optical surfaces is performed on a Fizeau interferometer. To compare the results of experiments numerical simulation software MSC.Marc/Mentat was used.

Keywords: optical manufacturing, cementing lenses, deformation, thermal stress, Fizeau interferometer, numerical simulation.

Obsah

1 Úvod	10
2 Teoretická část	11
2.1 Rozdělení čoček	11
2.2 Vady optických soustav	15
2.2.1 Monochromatické vady	15
2.2.2 Chromatické vady	18
2.3 Vlastnosti optického skla	20
2.3.1 Mechanické vlastnosti.	20
2.3.2 Tepelné vlastnosti.	21
2.3.3 Chemické vlastnosti.	22
2.4 Sdílení tepla	22
2.4.1 Vedení (kondukce)	23
2.4.2 Proudění (konvekce)	23
2.4.3 Sálání (radiace, záření)	24
3 Technologie výroby čoček	26
3.1 Volba optického materiálu	26
3.2 Upínání čočky	27
3.2.1 Tmelení	27
3.2.2 Vakuové přisávání u brousicích CNC strojů	30
3.2.3 Upínání v lešticích CNC strojích	30
3.2.4 Vkládání do kleštiny	31
3.3 Broušení	31
3.3.1 Ruční broušení	32
3.3.2 Strojní broušení	33

3.4 Leštění	36
3.4.1 Klasická technologie autorotační kývavé kinematiky	37
3.4.2 Technologie „SynchroSpeed“	38
3.4.3 Technologie „HydroSpeed“	40
3.4.4 Technologie A-FJP (Active Fluid Jet Polishing)	41
4 Požadavky na kvalitu optického povrchu a jeho měření	42
4.1 Požadavky na kvalitu broušených ploch	42
4.1.1 Měření středové tloušťky čočky	42
4.1.2 Měření drsnosti povrchu	45
4.1.3 Měření tvaru (rádiusu) broušených optických povrchů	47
4.2 Požadavky na kvalitu leštěných ploch	48
4.2.1 Měření tvaru leštěných optických povrchů	48
5 Praktická část	52
5.1 Experiment	52
5.2 Numerická simulace	57
6 Závěr	63
Použitá literatura	64

1 Úvod

Tato práce je zaměřená na zkoumání vlivu teploty při výrobě optických ploch. Motivací pro výběr tohoto tématu posloužilo to, že vzhledem k rostoucím požadavkům na optické komponenty roste také nutnost podrobnější analýzy výrobních procesů a jevů vedoucích k výsledné deformaci optické plochy. Snahou je využít v praxi teoretické znalosti, získané během studia v oblasti přenosu tepla a nově je spojit s oborem optiky.

Cílem této práce je:

- získání základních znalostí týkajících se technologie výroby optických elementů,
- seznámení se s vyskytující problematikou chování optických skel při výrobě,
- experimentální určení teplotní namáhání při tmelení čočky,
- analyzovat vliv teplotního namáhání na výsledný tvar optické plochy.

Přestože existuje mnoho možností uchycení optických elementů, tmelení je stále nejpoužívanějším způsobem uchycení a některé typy optických elementů (např. hemisférické nebo asférické povrchy) jsou tímto způsobem uchycovány v naprosté většině případů. Technologie tmelení vyžaduje ohřev čočky a tmelky, což způsobuje pro optický tvar čočky určité deformace, s čímž při výrobě je nutné počítat.

Druhá kapitola diplomové práce v sobě zahrnuje vybrané teoretické poznatky, potřebné k pochopení problematiky chování optických skel, resp. čoček. Seznamuje čtenáře s rozdělením čoček a jejich použitím, popisuje nejčastěji se vyskytující vady optických soustav, uvádí základní vlastnosti optického skla a zmiňuje se o mechanismu přenosu tepla.

Třetí kapitola popisuje technologie výroby čoček. Obsahuje důležité poznatky týkající se tmelení, broušení a leštění optických povrchů. Důraz byl kladen především na poskytnutí základních znalostí ve sféře optické výroby.

Čtvrtá kapitola se věnuje zásadám měření a vyhodnocování kvality optických povrchů, vysvětluje principy kontaktního a bezkontaktního měření středové tloušťky čočky a drsnosti optického povrchu. Dále popisuje měření tvaru vyleštěných ploch pomocí Fizeau interferometru a vysvětlí tolerance tvaru optické plochy.

V páté kapitole bude experimentálně vyšetřen průběh deformace tvaru na jednotlivých tmelkách. Měření optického povrchu proběhne na Fizeau interferometru, poté se z interferenčních obrazců provede vyhodnocení získaných výsledků. Následně bude vytvořen model pro numerické simulace. Numerická simulace bude provedena prostřednictvím softwaru MSC.Marc/Mentat založeného na metodě konečných prvků.

2 Teoretická část

2.1 Rozdělení čoček

V dnešní době si už nelze představit svět bez optických přístrojů, k nimž patří např. dalekohledy, fotoaparáty či mikroskopy. Součástí téměř všech optických přístrojů jsou čočky.

Čočka je tvořena z průhledného materiálu, jako je sklo, optické sklo, krystaly, opticky průhledné plasty a popř. další materiály. Rozvoj technologií a zpřísnění požadavků na růst dokonalosti optických přístrojů vedl k vytvoření zvláštní skupiny technického skla – optického skla. Od jiného skla se optické sklo liší zejména vysokou průzračností, čistotou, homogenitou, a také přesně definovaným indexem lomu a disperzí¹. Splnění všech těchto požadavků výrazně komplikuje a zvyšuje náklady na výrobu optického skla.

Optická výroba je velmi náročný proces, který do sebe zahrnuje spoustu technologií a úvah, avšak s příchodem CNC strojů přestala být výroba čoček složitých tvarů tak obtížná, jako tomu bylo dříve. V procesu výroby precizní optiky vzniká řada specifických problémů, které jsou spojeny s materiálovými vlastnostmi, působením teploty a procesy přenosu tepla. Pod pojmem "precizní optika" se rozumí vysoce přesná optika s velmi nízkou drsností povrchu, velmi vysokou přesností tvaru a vysokou povrchovou celistvostí.

Dle konstrukčních provedení lze obecně čočky rozdělit na rovinné, sférické a asférické [1].

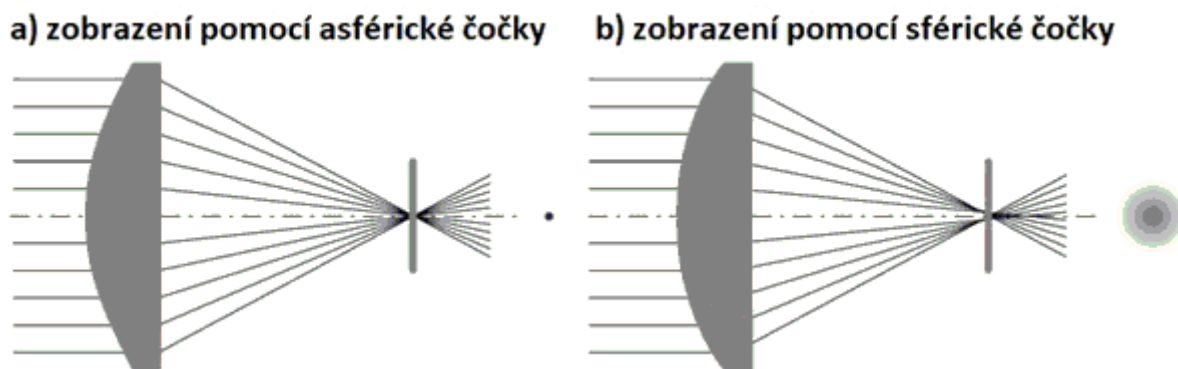
Sférickou čočkou se nazývá čočka, která má obě plochy sférické, nebo jednu plochu sférickou a druhou rovinnou. Sférická čočka je tvořena kulovou plochou, která má konstantní poloměr zakřivení (rádius) od středu až po okraj.

Asférickou čočkou se nazývá čočka, u které jedna nebo obě plochy jsou asférické. Na rozdíl od sférické plochy, má asférická plocha od středu k okraji variabilní poloměr zakřivení. Asférický povrch se získává otáčením kolem osy symetrie křivek elipsy nebo paraboly. Asférické čočky mají velmi dobré zobrazovací vlastnosti i v periférii, kde obraz není tolik zkreslený jako u sférických čoček.

¹ Disperze (světla) je jev při kterém dochází během průchodu světla látkou k rozložení bílého světla na jednotlivé barvy.

Obecně lze říci, že jsou asférické čočky ve srovnání s tradičními čočkami mnohem tenčí, lehčí a plošší, mají vysokou kvalitu obrazu a optické vady jsou minimalizovány. Při navrhování optického systému může jeden asférický povrch nahradit 2 až 3 sférické plochy, což vede k prudkému snížení počtu dílů tohoto systému [2]. Výrobu asférického povrchu ovlivňuje složitost a přesnost geometrie, což je časově více náročné, stoupají tak výrobní náklady a tím i jejich cena na trhu.

Významnou nevýhodou všech, včetně ideálních sférických čoček, je sférická aberace². Asférická čočka může být navržena tak, aby minimalizovala aberaci nastavením kónických konstant a asférických koeficientů zakřiveného povrchu čočky. Ve srovnání se sférickým tvarem čočky (obr. 2.1), může správně navržený asférický tvar odstranit sférickou aberaci a snížit tak i jiné optické odchylky.



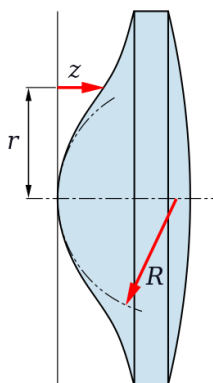
Obr. 2.1: Rozdíl mezi zobrazením asférickou (a) a sférickou (b) čočkou

Sférický povrch lze definovat pouze jedním parametrem – poloměrem zakřivení, avšak rotačně symetrické asférické povrchy (viz obr. 2.2) jsou nejčastěji definovány podle normy ISO 10110-12:2007 jako:

$$z = f(r) = \frac{\frac{r^2}{R}}{1 + \sqrt{1 - (1 + \kappa) \left(\frac{r}{R}\right)^2}} + \sum_{n=2}^m A_{2n} \cdot r^{2n}, \quad (2.1)$$

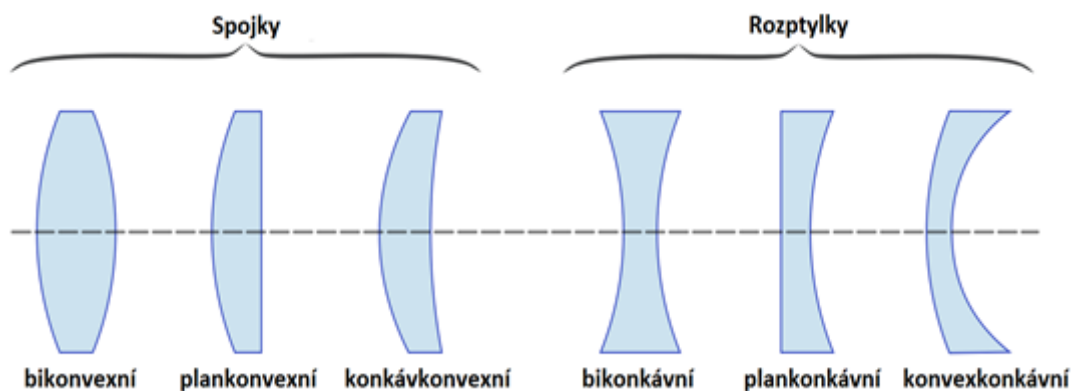
² Aberace je vada při zobrazení čočkou.

kde se předpokládá, že optická osa leží ve směru z , z je složka posunu povrchu od vrcholu ve vzdálenosti r od optické osy, R je poloměr zakřivení, κ je konická konstanta (0 pro koule, -1 pro parabolu, menší než -1 pro hyperbolu, v intervalu mezi -1 a 0 pro zploštělý sféroid, větší než 0 pro protáhlý sféroid), A_{2n} jsou sudé koeficienty, popisující odchylku povrchu od axiálně symetrické kvadratické plochy, která se popisuje R a κ .



Obr. 2.2: Asférická čočka [2]

Dle uspořádání ploch můžeme čočky dělit na **spojné** (spojky) a **rozptylné** (rozptylky), které jsou vyznačeny na obr. 2.3.

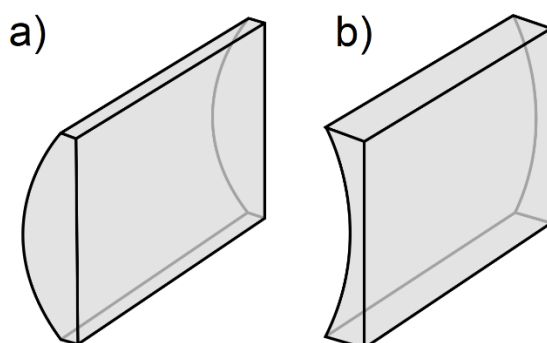


Obr. 2.3: Základní druhy čoček

Spojky jsou vždy uprostřed silnější, než na okrajích a mají vždy jeden povrch vypuklý (konvexní). Podle tvaru druhého povrchu se dělí na: bikonvexní (druhý povrch je také vypuklý), plankonvexní (druhý povrch je rovinný), konkáv-konvexní (druhý povrch je dutý). Spojky přeměňují rovnoběžný svazek paprsků ve svazek sbíhavý.

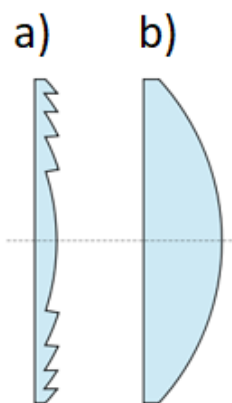
Rozptylky jsou naopak uprostřed tenčí, než na okrajích a mají jeden povrch dutý (konkávní). Rozptylky se dělí na: bikonkávní (druhý povrch je také dutý), plankonkávní (druhý povrch je rovinný), konvex-konkávní (druhý povrch je vypuklý). Rozptylky se mění rovnoběžný svazek paprsků na rozbíhavý.

Válcová (cylindrická) čočka je čočka ve tvaru válce. Válcové čočky zaostřují nebo rozšiřují paprsek světla podél jedné osy. Optické chování válcových čoček odpovídá "normálním" (sférickým) čočkám [3]. Z toho vyplývá, že čistě válcová čočka zaostřuje paralelně dopadající světlo na ohniskovou přímku namísto ohniskového bodu. Jsou ideální pro generování laserové přímky. Čočky, představující pouze segmenty válců, jsou označovány jako válcové čočky. Na obr. 2.4 je znázorněno zobrazení pomocí válcové čočky. V případě, že na optickou soustavu dopadá svazek rovnoběžných paprsků, je pak obraz získán nikoli jako bod, ale jako přímka, jejíž délka se rovná délce čočky. Na obr. 2.4(a) je válcová spojka s pozitivní ohniskovou vzdáleností, obr. 2.4(b) znázorňuje válcovou rozptylku s negativní ohniskovou vzdáleností.



Obr. 2.4: Zobrazení válcovou čočkou. a) válcová spojka, b) válcová rozptylka

Fresnelova čočka je plochá čočka, která je tvořená rastrováním obvyklé sférické nebo válcové čočky. Fresnelova čočka má při stejných parametrech podstatně menší tloušťku a nižší hmotnost než běžná čočka, protože jsou z ní odstraněny ty části, na kterých nenastává lom světla při přechodu z materiálu čočky do okolního prostředí [4]. Tyto čočky se používají v majácích, signalizačních zařízeních, infračervených čidlech pohybu apod. Na obr. 2.5 je zobrazen rozdíl Fresnelovy (a) a klasické čočky (b).



Obr. 2.5: Porovnání čočky Fresnelovy (a) a klasické (b)

Torická čočka má ve dvou navzájem kolmých rovinách odlišný poloměr zakřivení, takže v každé rovině je jiná sbíhavost paprsků. Taková čočka se chová jako kombinace sférické a válcové čočky. Torické čočky se používají především v brýlích a kontaktních čočkách pro korekci astigmatismu. Kromě toho lze laserové paprsky zaostřovat do eliptických ohnisek.

2.2 Vady optických soustav

Žádné čočky nemají ideální zobrazení, i když jsou dokonale vyrobeny. Odchytky od charakteristik ideálních čoček se nazývají aberacemi. Aberace jsou dvojího typu, a to **monochromatické** a **chromatické**.

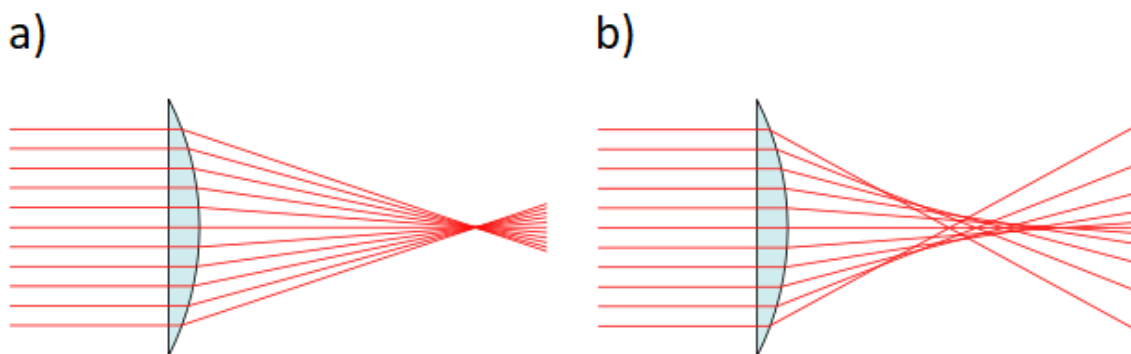
2.2.1 Monochromatické vady

Monochromatické vady vznikají na vlnové délce světla a ovlivňují spíše ostrost obrazu, nikoli barvu. K monochromatickým vadám patří:

a) Sférická aberace

Sférická vada (aberrace) je způsobena kulovým tvarem čočky a vzniká kvůli neshodě ohnisek paprsků světla, procházejících na různých vzdálenostech od optické osy. To vede k narušení homocentricity paprsků z bodového zdroje, aniž by došlo k narušení symetrie struktury těchto paprsků (na rozdíl od kómy a astigmatismu) [5]. Sférická aberace závisí na zakřivení povrchů a optické mohutnosti čočky. Proto použití optických skel s vysokými indexy lomu může snížit sférickou aberaci tím, že zvýší poloměr čočky při zachování optické mohutnosti.

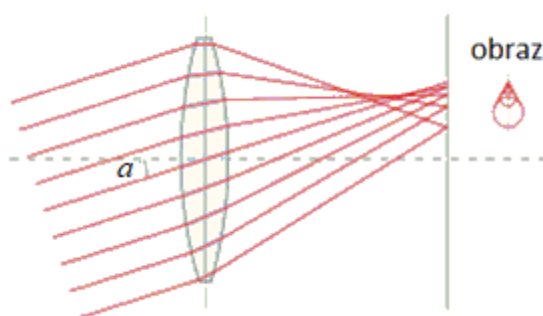
Na obr. 2.6(a) je zobrazena dokonalá sférická čočka bez sférické aberace: všechny příchozí paprsky jsou zaměřeny do ohniska. Na obr. 2.6(b) je znázorněna skutečná sférická čočka, která vytváří sférickou aberaci: různé paprsky se nesejdou v jednom ohnisku. Čím dále jsou paprsky od optické osy, tím blíže k čočce protínají optickou osu (pozitivní sférická aberace). "Pozitivní" sférická aberace znamená, že periferní paprsky jsou příliš ohnuté. "Negativní" sférická aberace znamená, že periferní paprsky nejsou dostatečně ohnuté.



Obr. 2.6: Porovnání dokonalé čočky bez sférické aberace (a) a čočky se sférickou aberací (b)

b) Kóma

Kóma je aberace, která vede k narušení homocentricity širokých světelných paprsků vstupujících do optického systému pod úhlem k optické ose. Kóma může být považována za sférickou aberaci paprsků neprocházejících optickou osou optického systému. Svazky paprsků po lomu nemají osovou symetrii, tzn., že paprsky procházející různými částmi optického systému, následně se pak setkávají v různých vzdálenostech od hlavního ohniska. Na obr. 2.7 je znázorněna kóma. Paprsky přicházející pod úhlem k optické ose nejsou shromažďovány v jednom bodě, svítící bod se pak mimo optickou osu optického systému zobrazí ve tvaru komety.

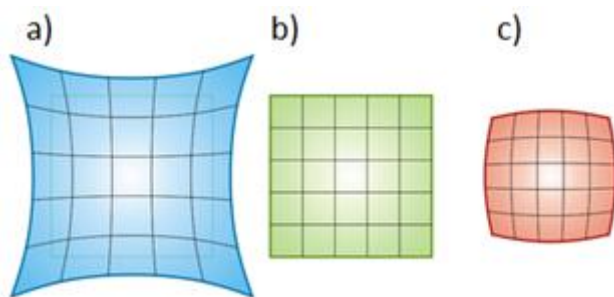


Obr. 2.7: Kóma [6]

c) Zkreslení

Zkreslení je aberace, která vzniká v důsledku změny příčného zvětšení v závislosti na úhlu zorného pole. Při zkreslení se porušuje geometrická podobnost mezi předmětem a obrazem. Optický systém, který není zkreslený, resp. který nemá žádné zakřivení přímek, se nazývá ortoskopický.

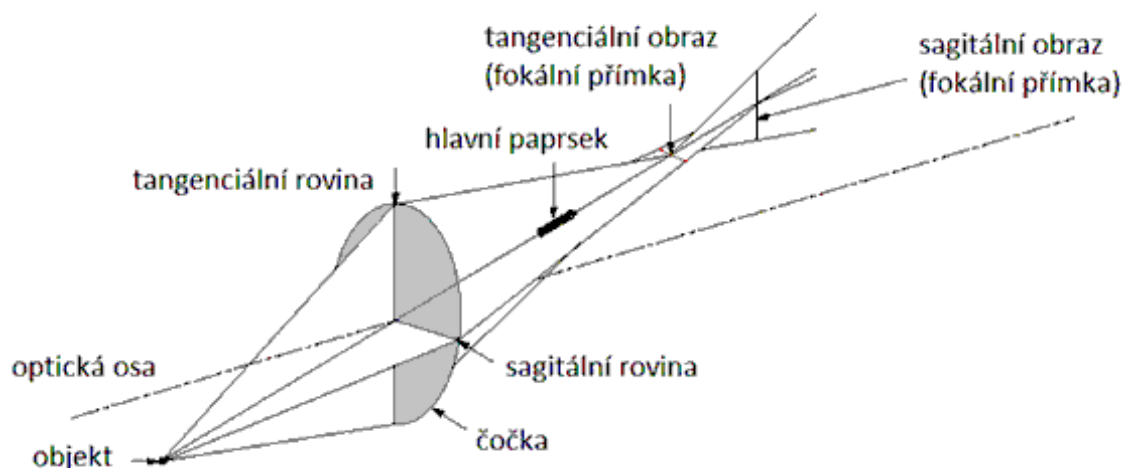
V důsledku zkreslení se přímky v obraze stávají křivkami, s výjimkou přímek ležících ve stejné rovině s optickou osou. Například obraz čtverce (viz obr. 2.8(b)), jehož střed protíná optickou osu, má při kladném zkreslení tvar polštáře (viz obr. 2.8(a)), a při záporném zkreslení tvar sudu (viz obr. 2.8(c)).



Obr. 2.8: Zkreslení. a) poduškovité zkreslení, b) bez zkreslení, c) soudkovité zkreslení [7]

d) Astigmatismus

Astigmatismus je závažná aberace, vznikající na sférických čočkách kvůli rozdílným ohniskovým vzdálenostem paprsků v různých fokálních rovinách. Astigmatismus se projevuje rozmazáním, protože body se v navzájem kolmých (sagitálních a tangenciálních) rovinách zobrazí v různé velikosti (viz obr. 2.9). Vzdálenost mezi fokálními rovinami je astigmatickým rozdílem. Čočky s astigmatickou vadou nemají v jedné rovině sagitální a tangenciální obrazy. O astigmatismu se blíže zmiňuje kapitola 4.



Obr. 2.9: Astigmatismus, inspirováno z [8]

e) Zklenutí zorného pole

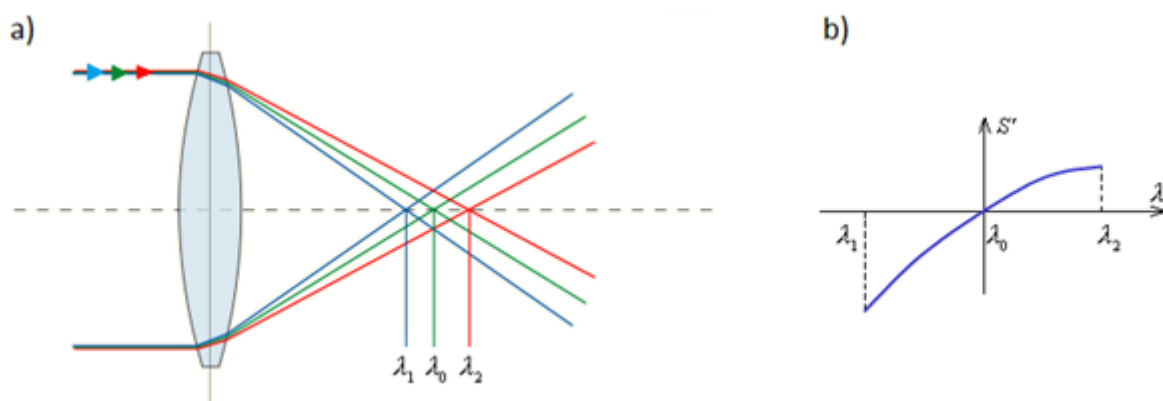
Zklenutí zorného pole je aberace, při které obraz rovinného předmětu kolmého na optickou osu čočky leží na zakřivené ploše. Tato aberace způsobuje nerovnoměrnou ostrost na různých místech obrazu. Pokud je zaostřená středová část obrazu, pak její okraje nebudou zaostřené, ale rozmazané. V případě zaostření okraje obrazu naopak nebude ostrá jeho centrální část. Tato aberace souvisí s astigmatismem.

2.2.2 Chromatické vady

Chromatická vada vzniká rozdílným indexem lomu světla. Index lomu světla je závislý na vlnové délce. Jelikož index lomu je závislý i na frekvenci, vzniká chromatická vada a různé vlnové délky se lámou pod různými úhly. Příkladem tohoto fyzikálního jevu je rozklad světla hranolem. Chromatické aberace se tak dělí na barevnou vadu polohy a barevnou vadu velikosti.

a) Barevná vada polohy

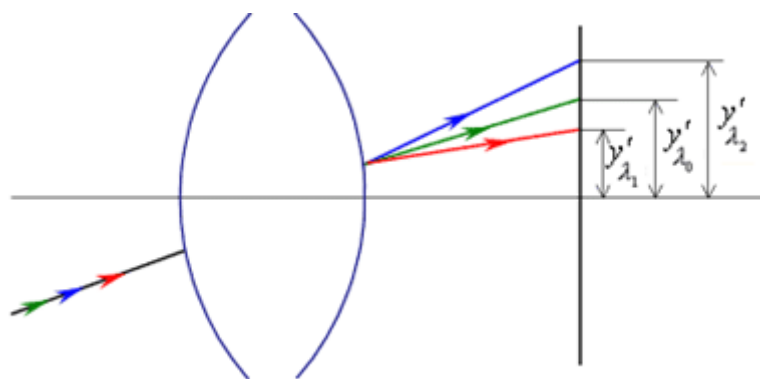
Barevná vada polohy se projevuje tak, že paprsky vytvořené jednotlivými vlnovými délkami světla vycházející z jednoho bodu na ose se spojují v různé vzdálenosti od ohniska (viz obr. 2.10(a)), přestože sférická aberace je v tomto případě odstraněná. Čím kratší je vlnová délka, tím je obraz blíže k optickému systému (viz obr. 2.10(b)), [9].



Obr. 2.10: Znáznornění barevné vady polohy. a) barevná vada polohy, b) graf závislosti vady polohy S' na vlnové délce λ

b) Barevná vada velikosti

Barevná vada velikosti se projevuje tím, že obrazy vytvořené paprsky různé vlnové délky mají odlišnou velikost (viz obr. 2.11). V důsledku této vady se namísto obrazu bodu vytváří barevný pruh.



Obr. 2.11: Barevná vada velikosti

2.3 Vlastnosti optického skla

Základním materiálem pro výrobu optických dílů je sklo. Sklo je amorfni látka, získaná přechladnutím roztavené skelné hmoty, přičemž proces přechodu od tekutého stavu k pevnému musí být vratný. Amorfni látky jsou látky v pevném skupenství, které nemají pravidelnou strukturu. Všechny pevné látky se dělí na krystalické a amorfni. Krystalické látky jsou anizotropní, to znamená, že mají nerovnoměrné vlastností v různých směrech. Opakem jsou látky amorfni. Tyto látky jsou izotropní, tedy že mají ve všech směrech stejné fyzikální vlastnosti. Jakákoli látka v závislosti na rychlosti chlazení se může stát jak krystalickou, tak amorfni. Příkladem je křemen, který může být krystalickým (krystal) a amorfni (křemenné sklo) v závislosti na podmínkách jeho vzniku [1].

2.3.1 Mechanické vlastnosti.

Hlavní vlastností skla, která určuje jeho zpracovatelnost při broušení a leštění, je tvrdost, která je definovaná jako odpor látky proti vnikání cizího tělesa. **Tvrdost** je závislá na struktuře krystalů, respektive na pevnosti vazeb mezi částicemi v látce. Sklo je křehkým materiálem. V katalozích optických skel se většinou určuje jeho tvrdost pomocí parametru „Tvrdost podle Knoop“ (HK z anglického *Hardness Knoop*). Knoopová tvrdost vyjadřuje množství povrchových změn v materiálu po odsazení zkušebního diamantu při daném tlaku a čase. Norma ISO 9385 popisuje postup měření pro skla. V souladu s touto normou jsou hodnoty pro tvrdost podle Knoop (HK) většinou uvedeny v katalozích pro zkušební sílu 0,9807 N a účinnou zkušební dobu 20 sekund. Zkouška se provádí na povrchu leštěného skla při pokojové teplotě. Mikrotvrdost je funkcí velikosti zkušební síly a snižuje se s rostoucí zkušební silou [10].

Pevnost skla se posuzuje mezní hodnotou napětí, které způsobuje jeho zničení. Sklo má poměrně vysokou pevnost v tlaku (zhruba $5 \cdot 10^{-6}$ Pa) a nízkou pevnost v tahu a ohybu (zhruba $5 \cdot 10^{-7}$ Pa). Důvodem nízké pevnosti skla v tahu je existence mikroskopických trhlinek na povrchu skla, vznikajících při tvarování. Pevnost v tahu se výrazně snižuje, pokud na povrchu skla po broušení a leštění vznikne např. prasklá vrstva [1].

Viskozita skla se vyznačuje třecí silou jedné vrstvy látky vzhledem k druhé a závisí na teplotě. Viskozita se u skel při změně teploty od pokojové teploty do 1400 °C mění v rozmezí (10^{12} - 10) Pa · s

Křehkost charakterizuje odolnost skla vůči nárazům. Křehkost závisí na vnitřním pnutí, ke kterému dochází, když se sklo ochladí po tavení.

Hustota optických skel se většinou mění v rozmezí $(2,2 - 6,0) \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$.

2.3.2 Tepelné vlastnosti.

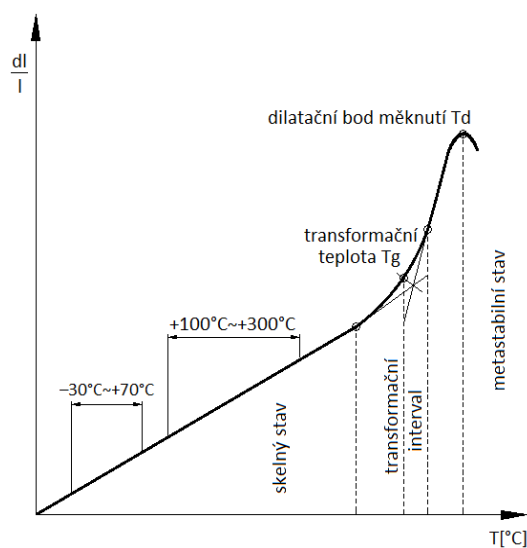
Znalost tepelných vlastností je nezbytná v případech tepelného opracování a namáhání skla. Znalost teplotní roztažnosti skla je důležitá v případě, že dochází k jeho tepelnému namáhání nebo pevnému spojení skla s jiným materiálem. Teplotní roztažnost se liší podle druhu skla.

Teplotní roztažnost je změnou délky tělesa při jeho zahřátí. Ve většině případů se jedná o délkovou teplotní roztažnost [11]. Střední lineární součinitel teplotní roztažnosti $\alpha_{\text{stř}}$ (K^{-1} ; $^{\circ}\text{C}^{-1}$) se vyjadřuje pomocí vztahu:

$$\alpha_{\text{stř}} = \frac{L_2 - L_1}{L_1} \cdot \frac{1}{T_2 - T_1}, \quad (2.1)$$

kde L_1 je počáteční délka, L_2 je koncová délka, T_1 je počáteční teplota, T_2 je koncová teplota.

Další důležitou charakteristikou skla je jeho dilatační křivka. **Dilatační křivka skla** udává průběh teplotní roztažnosti jako funkci teploty, viz obr. 2.12. Z dilatační křivky lze určit důležité viskozitní body, a to transformační teplotu T_g a dilatační bod měknutí T_d . V katalogích optických skel vždy uvádějí střední lineární součinitele teplotní roztažnosti pro nízký teplotní rozsah (-30°C až $+70^{\circ}\text{C}$) a pro vysoký teplotní rozsah ($+100^{\circ}\text{C}$ až $+300^{\circ}\text{C}$).



Obr. 2.12: Dilatační křivka skla

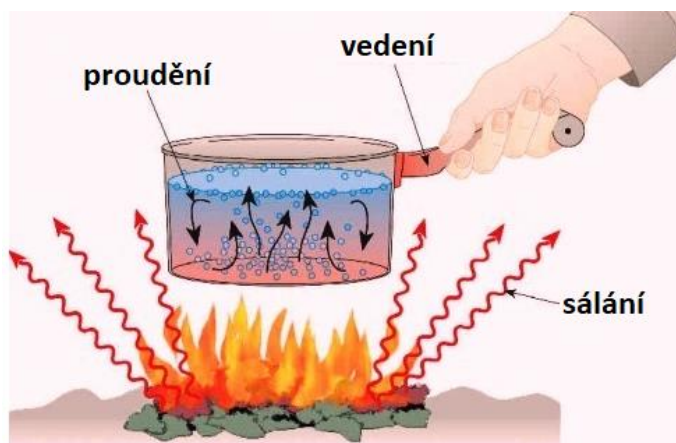
Tepelná vodivost je schopnost látky vést teplo. Rozsah hodnot tepelné vodivosti skla se pohybuje od $1,38 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ (čisté křemenné sklo) do cca $0,5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ (skla s vysokou koncentrací olova). Nejčastěji používaná silikátová skla pak mají hodnoty mezi (0,9 až $1,2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$).

2.3.3 Chemické vlastnosti.

Na proces zpracování optických dílů mají vliv také chemické vlastnosti skla. Chemické vlastnosti skla jsou vyjádřeny schopností odolávat chemickému působení okolního prostředí (voda, atmosféra, roztoky a taveniny). Některé chemické sloučeniny při interakci s povrchem skla tvoří vrstvu podobnou fólii, která brání dalším interakcím. Jiné látky (např. kyselina fluorovodíková) intenzivně ničí povrch skla. To se děje plynule, bez vytvoření fólie, s postupným vniknutím kyseliny do hloubky materiálu.

2.4 Sdílení tepla

Sdílení (přenos) tepla je složitý děj, který spočívá ve výměně tepla mezi dvěma tělesy s různou teplotou. Při tepelné výměně vždy teplejší těleso předává část své vnitřní energie chladnějšímu tělesu, což je důsledkem druhého zákona termodynamiky. Základní veličiny přenosu tepla jsou teplota a tepelný tok. Přenos tepla lze rozdělit do tří kategorií: vedení tepla pevnými látkami (kondukce), proudění (konvekce) a sálání (radiace). Na obr. 2.13 je jednoduché znázornění druhů přenosu tepla.



Obr. 2.13: Druhy přenosu tepla

2.4.1 Vedení (kondukce)

Přenos tepla vedením je jedním ze způsobů přenosu tepla v pevných tělesech, při kterém částice látky z oblasti s vyšší kinetickou energií předávají část své kinetické energie částicím do oblasti s nižší střední kinetickou energií. Částice s vyšší kinetickou energií se srážejí s částicemi s nižší kinetickou energií a kmitají kolem svých rovnovážných poloh. Z hlediska dynamiky procesu lze vedení tepla rozdělit na: stacionární (ustálené) vedení tepla (teplotní rozdíly se v určitém místě s časem nemění) a nestacionární (neustálené) vedení tepla (teplotní rozdíly se v určitém místě mění s časem).

Rychlost vedení tepla ze zahřáté části látky do chladnější části látky se určuje součinitelem tepelné vodivosti λ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), který vyjadřuje schopnost dané látky vést teplo. Čím je hodnota nižší, tím se teplo šíří danou látku pomaleji.

Vedení tepla popisuje Fourierův zákon [12]:

$$\dot{q} = -\lambda \nabla t, \quad (2.2)$$

kde \dot{q} ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) hustota tepelného toku, λ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) součinitel tepelné vodivosti, ∇t ($\text{K} \cdot \text{m}^{-1}$) teplotní gradient. Fourierův zákon uvádí, že vektor hustoty tepelného toku \dot{q} je úměrný teplotnímu gradientu ∇t ale má opačný směr.

2.4.2 Proudění (konvekce)

Tento způsob přenosu tepelné energie může být realizován pouze u látek, které se pohybují (kapalina, plyn, písek). Konvekci dochází k přenosu energie prouděním hmoty o různé teplotě. Přenos tepla prouděním je téměř vždy spojen s přenosem tepla vedením.

Při kvantitativním popisu přenosu tepla prouděním se používá Newtonův ochlazovací zákon:

$$\dot{q} = \alpha (T_o - T_w), \quad (2.3)$$

kde \dot{q} ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) je tok tepla na jednotku plochy stěny, α ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$) součinitel přestupu tepla, T_o (K) průměrná okolní teplota tekutiny a T_w (K) teplota povrchu stěny.

Z fyzikálního hlediska se konvekce dělí na volnou a nucenou [13].

Volná konvekce vzniká v důsledku změny teploty mezi teplotou povrchu stěny a teplotou okolního prostředí. Teplotní rozdíl způsobuje změnu hustoty látky, a tím i vznik vztlačových sil, které uvádějí látku do pohybu.

Nucená konvekce je vyvolaná účinkem vnějších sil na látku, např. ventilátorem, čerpadlem, kompresorem apod. Podstatou nucené konvekce je nezávislost teplotního rozdílu ΔT na součiniteli přestupu tepla α .

2.4.3 Sálání (radiace, záření)

Přenos tepla sáláním spočívá v přenosu elektromagnetického záření mezi dvěma tělesy (zářícím a absorbujícím), což vede ke zvětšení vnitřní energie absorbujícího tělesa. Přenos tepla sáláním není vázán na hmotné prostředí, co umožňuje přenos tepla ve vakuu, vzduchu a v některých dalších látkách (např. ve skle).

Elektromagnetické záření (vlnění) se šíří rychlostí světla v rozmezí vlnových délek (390–760) nm. Elektromagnetické záření vysílají všechny druhy těles. Pro přenos tepla sáláním je nejdůležitější elektromagnetické záření v rozsahu vlnových délek (10^{-4} - 10^{-7}) m. K tomu tedy přísluší záření ultrafialové, infračervené a záření světelné.

Množství vyzařené energie tělesem je závislé na jeho teplotě. Z tepelné energie vzniká tepelné záření, které se označuje pojmem emise. Přeměna záření v tepelnou energii se nazývá absorpce. Těleso, které pohlcuje (vyzařuje) maximální množství záření všech vlnových délek při dané teplotě se nazývá černé těleso. Černé těleso je ideální těleso, které ve skutečnosti neexistuje, protože jakýkoliv povrch alespoň malou část dopadajícího záření odrazí. Schopnost tělesa vyzařovat teplo určuje emisivita, která je definovaná jako poměr intenzity vyzařování reálného tělesa E ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) k intenzitě vyzařování absolutně černého tělesa E_0 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) za stejných teplotních podmínek. Emisivita je bezrozměrná veličina označována jako ε :

$$\varepsilon = \frac{E}{E_0}. \quad (2.4)$$

V reálu se setkáváme s tělesy označovanými jako tělesa šedá. Žádná skutečná tělesa tedy nemůžou mít $\varepsilon = 1$, ale pouze se hodnotě 1 mohou přiblížit. Šedá tělesa mají tedy hodnotu emisivity v intervalu $\varepsilon \in (0,1)$.

V roce 1879 byl Ludwigem Boltzmannem a Jožefem Stefanem publikován Stefanův-Boltzmannův zákon popisující celkové záření absolutně černého tělesa [14]. Tento zákon uvádí, že integrální intenzita vyzařování černého tělesa roste se čtvrtou mocninou termodynamické teploty:

$$E_0 = \sigma T^4, \quad (2.5)$$

kde σ je Stefan-Boltzmannova konstanta ($\sigma = 5,6704 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$), T (K) termodynamická teplota.

Pro záření šedých těles lze Stefanův-Boltzmannův zákon vyjádřit jako:

$$E = \varepsilon E_0 = \varepsilon \sigma T^4. \quad (2.6)$$

3 Technologie výroby čoček

Výroba optiky je posloupnost dílčích procesů, které na sebe navazují a finálním produktem je zcela unikátní optický výrobek, který v sobě nese preciznost a občas i kreativní design. Při opracování optických ploch se používá řada technologií. Při uvažování těchto technologií se tvoří výrobní proces. Stejně jako většina procesů ve strojírenství se skládá z předvýrobní etapy, výrobní etapy a odbytové etapy. Předvýrobní etapa obsahuje konstrukční přípravu (konstrukční a výrobní výkresovou dokumentaci), technologickou přípravu (výrobní postupy, nástroje, stroje), zásobování (zajišťuje potřebné materiály, polotovary, nářadí) atp. Výrobní etapa obsahuje veškeré činnosti, které přímo souvisí se zhotovováním výrobků. Při výrobním postupu musejí být řešené veškeré problémy v průběhu vzniklé, dále je nutné se zaměřit na technologie spojené s lepením (tmelením), broušením, leštěním, čištěním skla a také měřením a hodnocením povrchu zhotovovaného optického výrobku. Odbytová etapa se zabývá balením a expedicí výrobků. Vzhledem k tématu této práce bude pozornost věnována pouze výrobní etapě. K nejdůležitějším procesům samotné výroby patří upínání čočky, broušení a leštění.

3.1 Volba optického materiálu

Výroba jakékoliv čočky se začíná zkoumáním vlastností optického materiálu. Optické sklo musí být čisté, dokonale průhledné, homogenní a izotropní, aby se dalo docílit požadovaných optických vlastností – indexu lomu a míry disperze (Abbeovo³ číslo). Mechanické a tepelné vlastnosti optických skel, tj. součinitel teplotní roztažnosti, měrná tepelná vodivost, Knoppova tvrdost, brusná tvrdost a hustota, jsou také velmi důležité a je třeba je brát na zřetel při plánování výrobního procesu, aby nedošlo například k prasknutí skla z důvodu překročení dovolené teploty při ohřátí či prudkém vychladnutí. Znalost všech těchto parametrů je podstatná pro celkový přístup k opracování optické součásti.

³ Abbeovo číslo je bezrozměrné číslo udávající disperzní mohutnost skla v oblasti viditelného světla. Čím je Abbeovo číslo menší, tím je větší disperze a silnější chromatická aberace prostředí.

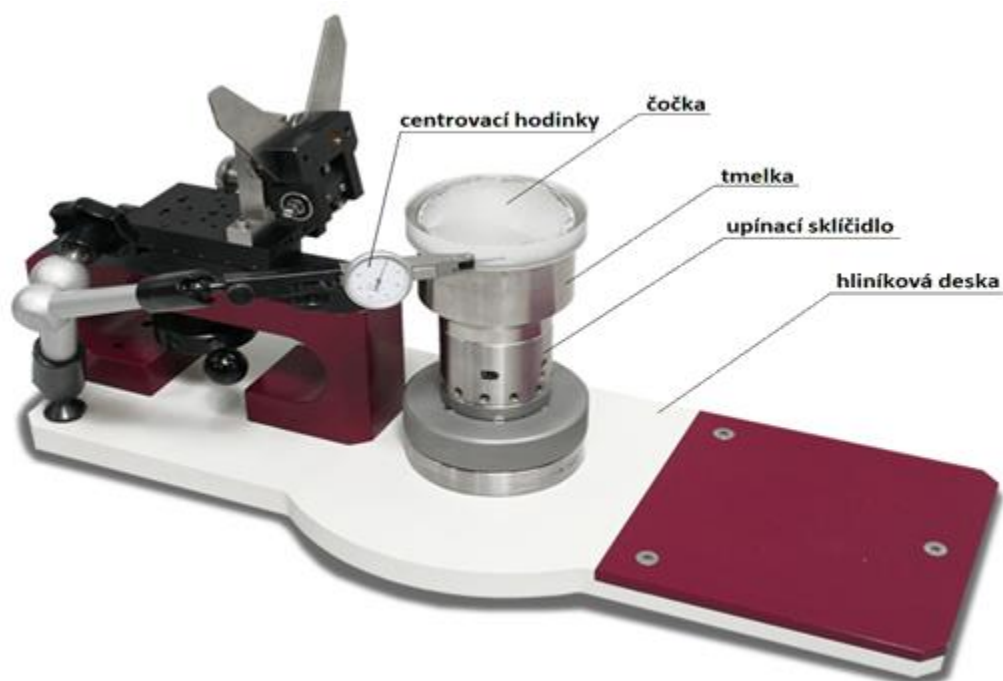
3.2 Upínání čočky

Pro vygenerování tvaru je nutné čočku na začátku upnout do držáku, aby při procesu obrábění skla vlivem mechanického namáhání nedošlo k vyosení čočky v radiálním směru, resp. upadnutí skla z držáku. Dle způsobu uchycení lze upínání rozdělit na lepení, vakuové přisávání a vkládání do kleštiny.

3.2.1 Tmelení

Tmelení patří mezi nejstarší a nepoužívanější technologie upínání obrobku v optické výrobě. Lepením se v optické výrobě rozumí technologie tvorby pevného spojení držáku a obrobku pomocí lepidla. Optické lepidlo musí být tavné a tepelně rozpustné. Je tvořeno většinou na bázi smol a vosků. Technologie lepení vytváří velmi pevné spojení a zaručuje zcela bezpečnou manipulaci ve strojích v porovnání např. s přisáváním pomocí vakua. Mezi značnou nevýhodu této technologie patří zdeformování (zkroucení tvaru) obrobku za tepla při sundávání z držáku z důvodu rozdílných teplot a roztažností materiálů, kdy dochází k deformaci a prasknutí obrobku. Lepení se používá jak při obrábění (broušení), tak i při leštění. Některé typy obrobku dosud není možné vyrábět tak, aby se dalo vyhnout lepení a s tím spojenému teplotnímu namáhání. Typickým příkladem tomu jsou asférické plochy.

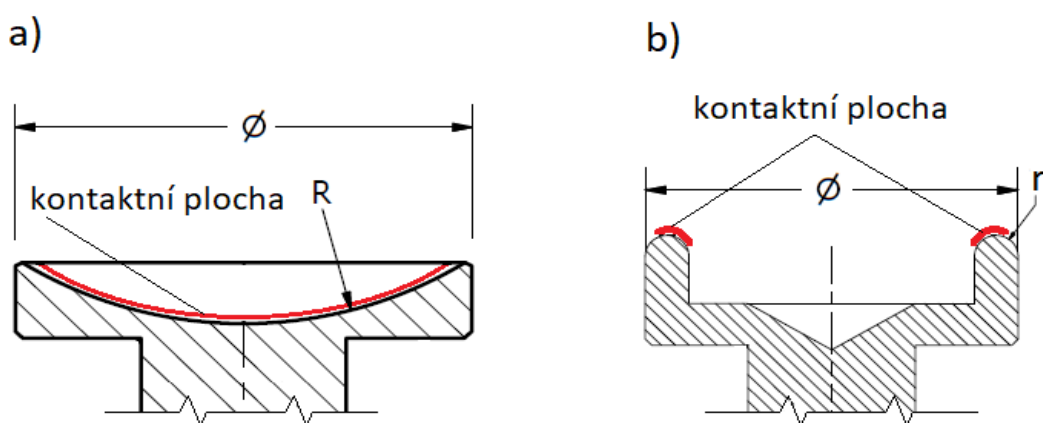
Pro realizaci této technologie se volí kovový držák (tmelka) hrnkového tvaru vyrobeného většinou z oceli nebo mosazi. Technologie lepení využívá lepidlo (tmel) na bázi smol a vosků, které se nanáší na zahřátou tmelku tenkou vrstvou. Protože proces tmelení probíhá za tepla a každý z přítomných materiálů (tmelka, tmel, obrobek) má jinou teplotní roztažnost, do obrobku se zanáší teplotní pnutí, které se po finálním opracování a sejmutí obrobku z tmelky projeví částečnou deformací tvaru plochy. Proces ohřívání většinou probíhá buď v peci, nebo pomocí průmyslového fénu v rozmezí teplot (50 až 120) °C v závislosti na vlastnostech optického skla a tmelu. Pro umístění obrobku na tmelce přesně podle požadovaných tolerancí se během procesu lepení provádí centrování a klínování na lepicích stanicích (viz obr. 3.1). Při lepení lze dosáhnout mikronové přesnosti centrování a klínování obrobku pomocí úchylkoměrů (hodinek), což je velkou výhodou ve srovnání s jinými upínacími technologiemi, avšak tento postup je časově velmi náročný.



Obr. 3.1: Lepicí stanice [15]

3.2.1.1 Tmelky

Tmelkou se v optice nazývá kovový držák, na který se nalepuje optický polotovar pro další manipulaci ve strojích. Vyrábí se většinou z oceli nebo mosazi. Tmelka musí být vyrobena velmi přesně z geometrického hlediska. Vyžaduje především přísnou toleranci na házivost (centr a klín) až do $5\ \mu\text{m}$ v součtu. Povrch kontaktní plochy tmelky musí být vždy hladký. Tmelky lze dle tvaru rozdělit na rádiusové (obr. 3.2 (a)) a hrnkové (obr. 3.2 (b)).



Obr. 3.2: Základní druhy tmelek. a) rádiusová tmelka, b) hrnková tmelka. \varnothing – průměr tmelky, R – rádius tmelky (odpovídá negativu čočky a je kontaktní plochou), r – poloměr zaoblení tmelky (je kontaktní plochou)

Ve srovnání s rádiusovou tmelkou je hrnková tmelka univerzální, protože na ni lze natmelit obrobek téměř jakéhokoliv rádiusu. Univerzální tmelky však mají menší kontaktní plochu mezi obrobkem a tmelkou, a tím i menší množství tmelu mezi nimi, což v důsledku může způsobit nedostatečné upevnění obrobku na tmelce. Rádiusové tmelky umožňují lepší upevnění obrobku, avšak jsou použitelné pouze pro obrobky odpovídající negativu rádiusu tmelky.

3.2.1.2 Tmely

Pro upevnění optického skla na tmelkách v závislosti na typech optických skel se používají tmely na bázi přírodních a syntetických smol nebo vosků, které obsahují různá změkčovací činidla a plniva v závislosti na jejich použití. Ideální tmel musí splňovat požadavek pevného spojení s nejmenším vnitřním pnutím, být stabilní a zároveň umožňovat snadné sundání z tmelky po dokončení procesu. Mezi nejpoužívanější optické tmely patří [16]:

Syntetické pryskyřice typu MKS jsou ropné pryskyřice na základě keton-formaldehydové pryskyřice, odolné vůči chladicím látkám obsahujícím olej. Používají se téměř ve všech krocích zpracování optického skla. Jsou rozpustné v ethanolu a acetonu. Mají bod tání mezi (66 až 70) °C. Rozkládají se při 180 °C.

Syntetické pryskyřice typu CK jsou určeny pro tmelení s minimálním napětím a jsou vhodné pro aplikace, kde je vyžadována extrémně vysoká pevnost. Díky své odolnosti vůči minerálním řezným olejům mohou být použity pro vrtání a řezání skla a keramiky. Mají bod tání mezi (66 až 70) °C. Jsou rozpustné v ethanolu a acetonu. Rozkládají se při 180 °C. Kvůli chemickému složení nelze syntetické pryskyřice typu CK používat opakovaně [16].

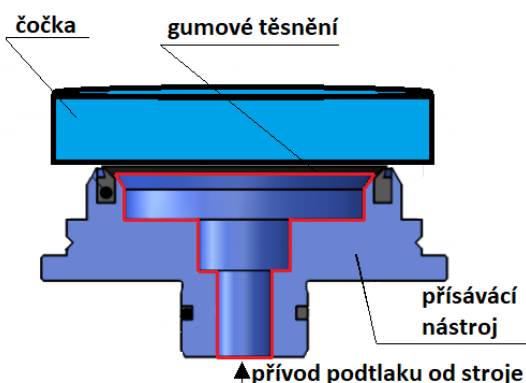
Lepicí vosky (typ F28, HBJ I, HBJ II, HBJ III) se skládají většinou z přírodních či syntetických vosků. Mají především velmi nízkou teplotu tání. Jsou vhodné pro lepení vyžadující nízké napětí a teplotní namáhání. Často se používají při dokončovacích operacích, protože vosky mají schopnost chránit povrch čočky při kontaktu s tmelkou. Sloučeniny vosku jsou extrémně hořlavé. Typ **F28** má bod tání cca 70 °C. Typy **HBJ I, HBJ II, HBJ III** mají bod tání cca 60 °C. Všechny uvedené typy lepicích vosků jsou rozpustné v benzínu a dobře se sundávají z povrchu skla při 80 °C v ultrazvukové čistící lázni.

Červený (měkký) vosk je vyroben z včelího vosku a terpentýnu smíchaného v poměru 5:1. Má charakteristickou červenou barvu. Bod tání tohoto vosku se pohybuje mezi (43 až 49) °C. Je vhodný pro velmi citlivá skla. Je rozpustný v benzínu.

3.2.2 Vakuové přisávání u brousicích CNC strojů

Touto technologií se obrobek upíná v držáku pomocí vakua, resp. podtlaku od stroje. Hlavní výhodou této technologie je vyhnout se teplotnímu namáhání, a je tak velmi vhodná při obrábění citlivých druhů skel. Vakuové přisávání však není možné použít pro povrchy čoček vyžadující složitější geometrie, jako například hemisférické a asférické povrchy. Naopak tato technologie našla uplatnění především u čoček sférických povrchů. Na obr. 3.3 je znázorněn princip vakuového přisávání.

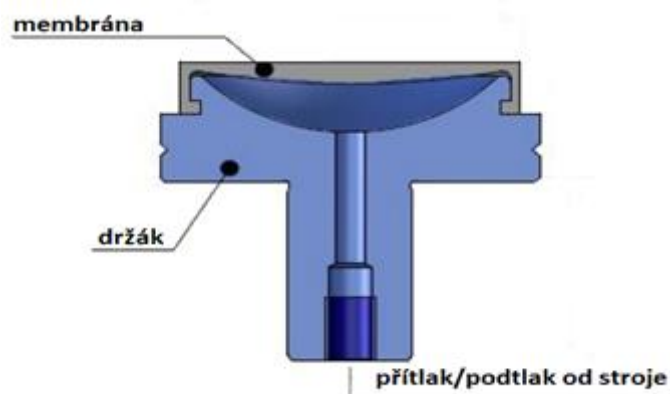
V brousicích CNC strojích pro přisávání čočky se používá hodnota pracovního podtlaku mezi (0,6 až 0,9) bar, což je dostačující díky gumovému těsnění mezi přisávacím nástrojem a čočkou. Aby však docházelo k pevnému upnutí čočky, je důležitým požadavkem pro stabilní přisávání čočky co nejhladší povrch spodní strany čočky bez vystouplých částic.



Obr. 3.3: Princip vakuového přisávání čočky [17]

3.2.3 Upínání v leštících CNC strojích

V leštících CNC strojích se čočka vkládá do upínací matice, především při použití leštící technologie „SynchroSpeed“ (viz kap. 3.4). Uvnitř této matice je pružná membrána. Při vkládání čočky do matice se membrána pomocí podtlaku od stroje nasaje a čočka se upne v držáku. Poté se nástroj a čočka přiblíží k sobě na relativně blízkou vzdálenost (mezeru), zapne se přítlak, který nafouknutím membrány přitlačí čočku na leštící nástroj. Na obr. 3.4 je znázorněn ten leštící držák s pružnou membránou. Hodnota přítlaku se pohybuje v rozmezí cca (0,5 až 2) bar.



Obr. 3.4: Princip leštícího držáku s pružnou membránou [17]

3.2.4 Vkládání do kleštiny

Technologie vkládání čočky do kleštiny je relativně nová. Je založena na principu, kdy se čočka vkládá do kovového segmentovaného držáku (viz obr. 3.5), který pomocí přtlaku vzniklého od stroje svírá čočku do tzv. kleštiny. Poté je čočka napevno upnutá a zároveň vycentrovaná. Nevýhody tohoto druhu upínání však jsou neuniverzálnost držáku (pro různé průměry čoček je vždy třeba vyrobit nový držák), nákladná výroba těchto držáků, vkládání do kleštiny neumožňuje kulacení čočky během procesu a musí být dodržena přesná tolerance na průměr obrobku (při malém překročení tolerance čočka buď praská, nebo se neupíná).



Obr. 3.5: Kovový segmentovaný držák ("Collet chuck") [17]

3.3 Broušení

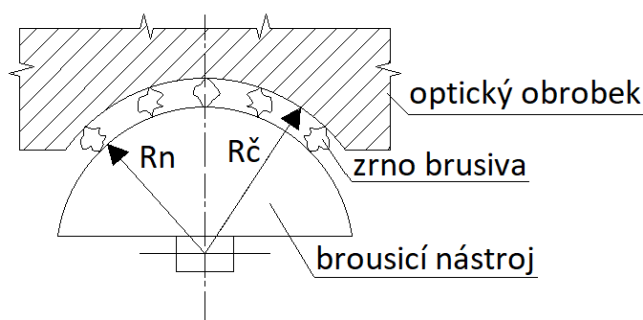
Broušení je mechanický proces, kterým je z povrchu obrobku odebírána vrstva materiálu potřebná k odstranění všech drsností a defektů po předchozím opracování. Broušení se obecně provádí v několika fázích: hrubé, střední, jemné (příprava povrchu před leštěním). A to z důvodu odlišného odběru materiálu při různých zrnitostech diamantových nástrojů

nebo brusiv. Zásadou správného vícestupňového broušení je odebrat vždy vrstvu skla odpovídající tloušťce vrstvy narušené předcházejícím stupněm broušení. Kvalitně vybroušený obrobek by měl mít rovnoměrný tvar a povrch s jemnou mikrostrukturou bez defektů minimalizující proces leštění, čehož lze dosáhnout pouze vzájemně navazujícím vícestupňovým broušením. Broušení lze rozdělit na ruční a strojní.

3.3.1 Ruční broušení

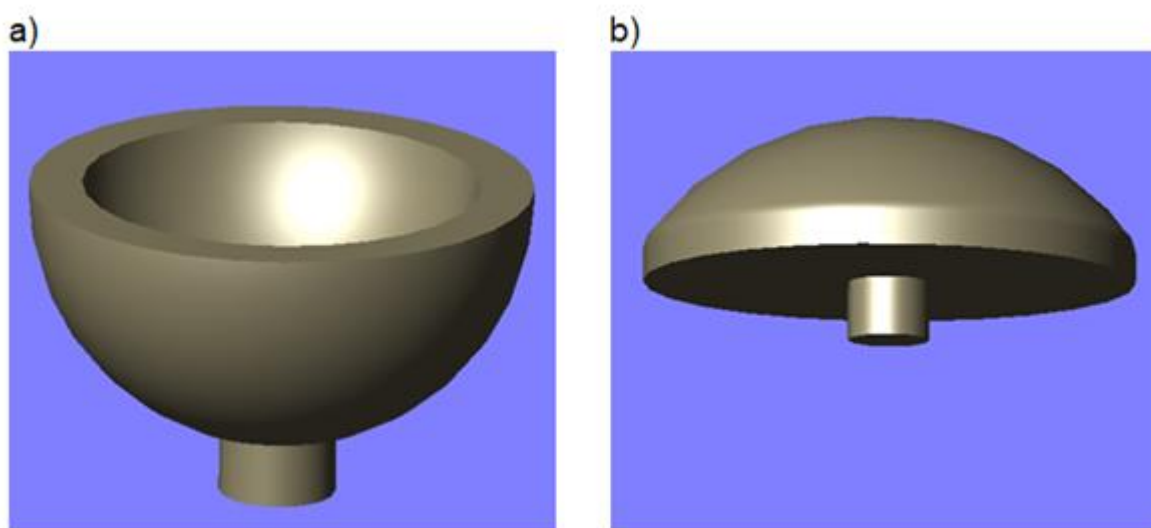
Nejdůležitější výhodou ručního broušení je možnost zásahu do samotného procesu a sledování směru broušení, což umožňuje provádět včasnou korekci povrchu. Klasické broušení provádí pracovník na vřetenovém stroji po jednom nebo více kusech nalepených na hlavičkách. Pracovník ručně přidržuje obrobek na rotujícím brousícím nástroji, přidává kývavý pohyb a současně překmitává přes okraj nástroje a přidává brusnou suspenzi. Při ručním broušení pracovník vhodnými pohyby obrobku po brousícím nástroji a jeho polohou vytváří optimální geometrický tvar plochy obrobků a povrch bez defektů, který je poté vhodný pro následné leštění.

Volné brusivo se mezi obrobek a nástroj přivádí ve formě brusné suspenze (viz obr. 3.6), která se nanáší štětcem na brousící nástroj od jeho středu směrem k obvodu. Obrusnost je závislá na koncentraci brusiva rozptýleného ve vodě. Pravidelné přimazávání brusné suspenze během celého procesu broušení je velmi důležité pro zachování obrusnosti a jakosti broušeného povrchu. Volné brusivo musí splňovat kritéria vyšší tvrdosti než opracováváný materiál. V praxi se používají kvalitní brusiva většinou syntetického původu jako karbid křemíku (SiC) a korund (Al_2O_3), které vykazují stejnorodost tvaru zrn a vysokou čistotu.



Obr. 3.6: Schematická ukázka obrábění volným brusivem. R_n – poloměr křivosti brousícího nástroje, R_c – poloměr křivosti čočky

Při broušení optického skla volným brusivem má rozhodující vliv na geometrický tvar obráběné plochy také brousicí nástroj (obr. 3.7), který při broušení kopíruje tvar pracovní plochy nástroje na obrobek. Pro vyhotovení plochy požadovaného geometrického tvaru je tedy potřeba použít nástroj odpovídajícího tvaru (protikus). Při broušení má nástroj tendence se opotřebovat a s tím také souvisí změna geometrického tvaru pracovní plochy nástroje. Největší opotřebení nástroje většinou vzniká u obvodu nástroje v závislosti na brusné rychlosti. S ohledem na výše uvedené skutečnosti lze stanovit, že při každém stupni odebrané vrstvy materiálu musí broušení začínat od okraje obráběné plochy a směřovat k jejímu středu.



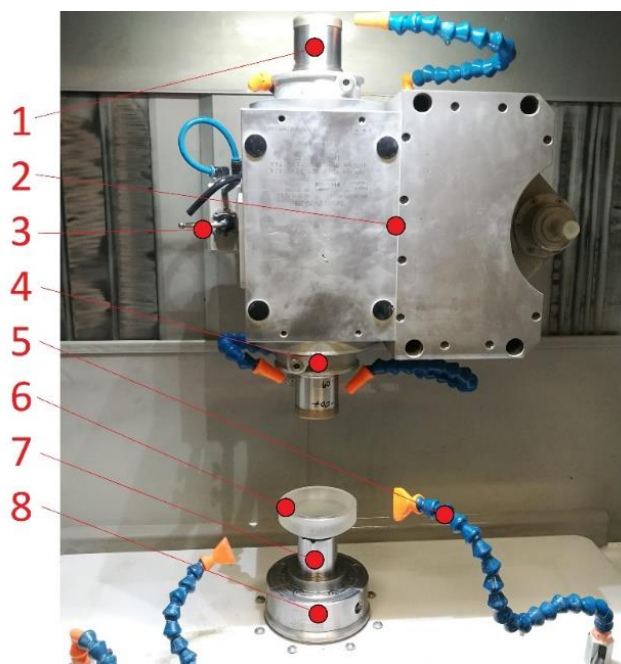
Obr. 3.7: Ukázka brousících nástrojů. a) miska pro broušení konvexních ploch, b) hříbek pro broušení konkávních ploch

V poslední době s vývojem moderních strojů se ruční broušení používá velmi zřídka a pouze ve výjimečných případech. Lze říci, že nové moderní stroje nahradily ruční broušení.

3.3.2 Strojní broušení

Strojní broušení lze rozdělit do několika skupin, a to na broušení na základě výkyvné technologie a broušení na CNC strojích. Z důvodu dostatečně dokonalého broušení na CNC strojích se výkyvná technologie v dnešní době používá velmi zřídka, a to většinou pro korekci předem vybroušeného tvaru nebo pro finální (jemné) broušení. Stále se však výkyvná technologie hojně používá v leštění pro splnění specifikací u náročných zakázek, protože některých zákazníkem požadovaných tvarů vyleštěných ploch nelze docílit na CNC strojích.

Při broušení na CNC stroji (viz obr. 3.8) se polotovar na tmelce se upne do sklíčidla (tzv. „chuck“) nebo se přisaje pomocí vakua, popř. se zavře v kleštině. Po upnutí polotovaru se do programu zadá jeho centrální tloušťka. Poté se pomocí dotyku odměřovací sondy na polotovar vypočte výška tmelky (příp. držáku), a to včetně vrstvy tmelu mezi tmelkou a polotovarem. Před vkládáním polotovaru do stroje je proto nutné polotovar vždy správně změřit. Měření se provádí buď na měřících stojánkách pomocí hodinek (dotyková metoda) nebo pomocí laseru (bezdotyková metoda). Změřenou hodnotu centrální tloušťky polotovaru CNC stroj považuje za etalon a od ní se pohybuje.

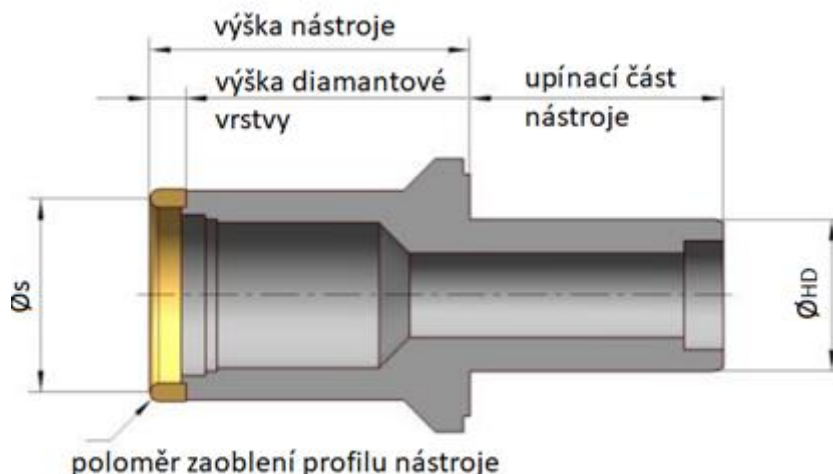


Obr. 3.8: Základní části optické CNC brusky. 1 – nástroj, 2 – hlava stroje, 3 – odměřovací sonda, 4 – vřeteno, 5 – dopravní tryska řezné kapaliny, 6 – obrobek (čočka), 7 – tmelka, 8 – upínací sklíčidlo

Broušení optických elementů se provádí diamantovými nástroji. Především se používají nástroje hrnkového a kotoučového tvaru. Hrnkové nástroje jsou určeny pro broušení sférických a rovinných povrchů. Nástroje kotoučového tvaru se používají především pro výrobu asférických povrchů. Průměr hrnkového nástroje musí odpovídat zhruba 70 % efektivního průměru budoucí čočky. Rozhodujícím faktorem pro volbu nástroje je typ optického skla a jeho vlastnosti. Při volbě nástroje se bere v úvahu velikost diamantového zrna, koncentrace diamantu a vazba mezi nástrojem a diamantem [18].

Pro splnění požadavků na broušení je k dispozici velký počet hrubostí diamantových nástrojů podle velikosti diamantových zrn. Tabulka těchto hrubostí byla sestavena podle

normy FEPA (Fédération Européenne des Fabricants de Produits Abrasives). Diamantová zrnitost se identifikuje předcházejícím písmenem D (např. D 64). Na obr. 3.9 je schematicky zobrazen hrnkový nástroj pro broušení sférických a rovinných povrchů.



Obr. 3.9: Diamantový nástroj hrnkového typu. $\varnothing s$ - středový průměr nástroje, $\varnothing HD$ - průměr pro hydraulické upínací skříčidlo do CNC stroje („chuck“)

Velikost zrna určuje abrazivní vlastností diamantových nástrojů, jakož i kvalitu povrchu dosaženou na obrobku. Vyšší abrazivní výkon se obecně dosahuje s hrubšími zrnitostmi. S jemnějšími velikosti zrnitosti se zlepšuje kvalita broušení, avšak dochází ke snížení abrazivního výkonu.

Koncentrace diamantu v brusné vrstvě ovlivňuje chování nástroje při broušení. Podle mezinárodní dohody pro označení koncentrace je základem hodnota C100, která odpovídá 25 % objemu čistého diamantu v brusné vrstvě. Vyšší koncentrace (C100, C125, C150) jsou vhodné, pokud je požadována vysoká stabilita profilu nástroje pro nízkou šířku brusné vrstvy a pro hluboké řezání. Nejčastěji se volí průměrné koncentraci (C50, C75) pro hrubé nástroje, které mají větší šířku brusné vrstvy a jemnější zrnitost (D64, D76). Nižší koncentrace (C38, C50) jsou primárně používány pro jemné rozměry zrnitosti (D15, D20), tj. pro jemné nástroje.

Broušení diamantovými nástroji je také závislé na **vazbě**. Podstatou vazby je udržovat brousící nástroj v optimálních podmínkách při vyskytujících teplotách způsobených broušením a zároveň umožnit snadné vypuštění obroušeného materiálu. Mezi nejpoužívanější vazby patří vazba kovová (tvrdá) a vazba pryskyřičná (měkká). Při obrábění tvrdších materiálů se používají

měkké a snadno se obnovující vazby, jako je např. vazba pryskyřičná. Naopak při obrábění měkkých materiálů se používají tvrdé vazby, např. vazba kovová. Pro obnovení diamantových zrn se používají tzv. dresovací kameny, které se skládají ze směsí karbidu křemíku nebo oxidu hlinitého a speciálního keramického pojiva.

Pro odvod tepla při broušení a také ke zlepšení jakosti obráběného povrchu a zvýšení trvanlivosti obráběcích nástrojů je nezbytné používat řeznou kapalinu. V optice je čistota důležitou položkou, a proto musí být řezná kapalina především čistá a bez příměsí. Základem optických řezných kapalin je demineralizovaná voda, tj. voda zbavená všech iontově rozpustných látek. Pro mazací účinek se používají speciální minerální oleje o koncentraci (1- 4) %. Ze zásobníku se tato kapalina ochlazuje v chladiči na teplotu odpovídající teplotě místnosti (tj. cca 22 °C) a po ochlazení pak teče do stroje. Během procesu kapalina ze stroje odtéká do separátoru, ve kterém se z kapaliny odstraňují částice broušeného optického materiálu (sklovina), poté se ten cyklus opakuje. Souběžně také probíhá chlazení vřeten stroje.

3.4 Leštění

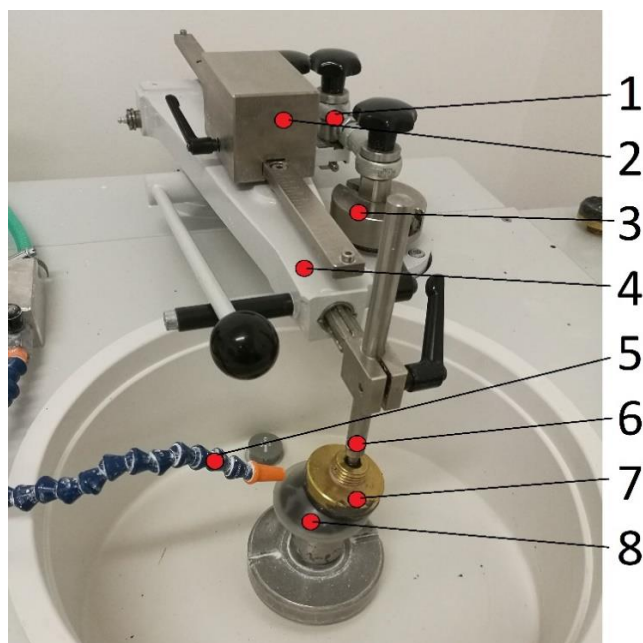
Leštění je operace, při které dochází k odebírání tenčích vrstev obráběného materiálu a tvorbě homogenního hladkého a lesklého povrchu malé drsnosti. Leštění předchází jemné broušení. Vybroušený kus optického materiálu, který není vyleštěný, má matový a neprůhledný povrch. Z mechanického hlediska je leštění založeno na narušování a odebírání obráběného materiálu z povrchu obrobku jemnými abrasivními částicemi nacházejícími se v leštící suspenzi. Současně během tohoto procesu mezi leštící podložkou, leštící suspenzí a povrchem obrobku vzniká tření, které tomu napomáhá. Z chemického hlediska je leštění založeno na teorii aktivní viskózní vrstvy skla, která se vytváří na povrchu leštěného materiálu zahříváním třením částic leštící suspenze. Vznikající teplo způsobuje chemickou reakci, při které dochází k rozpouštění odleštěného materiálu ve vodě, kterou obsahuje leštící suspenze. Proto se leštící suspenze po delší době leštění stává zásaditou.

V optice se funkční leštěné povrchy vyrábějí v přesnostech, které se pohybují v řádu (0,0005–0,00005) mm. Takováto přesnost se však neurčuje v milimetrech, ale pomocí jednotek vyjádřených jako zlomek vlnové délky světla (např. $\lambda/2$). Na měření tvaru vyleštěných povrchů se většinou používají interferometry, které vyjadřují tvar povrchu pomocí interferenčního obrazce. Princip měření optických povrchů bude popsán v následující kapitole.

Dle odlišnosti principu leštění lze rozdělit následující nejpoužívanější technologie na: klasickou technologii autorotační kývavé kinematiky, technologii „SynchroSpeed“, technologii „HydroSpeed“ a technologii A-FJP.

3.4.1 Klasická technologie autorotační kývavé kinematiky

Tato technologie je založena na velmi primitivním mechanickém principu, který však umožňuje tvorbu přesně vyleštěných optických ploch. Vykazuje velice výborné výsledky zejména tam, kde CNC technologie nemůžou dosáhnout požadovaných parametrů. Základem této technologie je spodní rotační vřeteno, na kterém je umístěna budoucí čočka. Na čočku je seshora položen leštící nástroj zhruba totožného průměru čočky. Leštícím nástrojem je kovový držák pokrytý vrstvou leštící smoly. Tvar leštícího nástroje je přesně opačný tvaru čočky. Tento kovový držák má shora uprostřed důlek, ve kterém je zasazen kovový vodící kolík přitlačený nastavitelným závažím. Tento vodící kolík v důlku držáku tvoří kulové třecí ložisko, což umožňuje kývavý pohyb leštícího nástroje. Tento kývavý pohyb je odvozen od excentru a přes ojnici je předán na rameno, kde je na opačném konci umístěn vodící kolík (viz obr. 3.10). Výkyv se dá měnit. Mezi obrobek a leštící nástroj ze smoly se přidává leštící suspenze (tzv. leštivo). Při leštění smolou lze dosáhnout nejvyšší kvality vyleštěného povrchu. Při tření molekul leštiva, smoly a obrobku se smola zahřívá a kopíruje tvar povrchu obrobku. Nevýhodou je však malá životnost tvaru nástrojů ze smoly, který je potřeba pravidelně upravovat. Aby docházelo k rovnoměrnému pokrytí nástroje leštivem a současně ke chlazení povrchu obrobku i nástroje, provádí se drážkování. Drážky se vyrábí ručně prořezáváním smoly ve tvaru pravidelné mřížky. Tato technologie nepatří mezi výkonné technologie, protože leštění jedné čočky může zabrat (4-12) hodin, což je ve srovnání s moderními technologiemi hodně, avšak pro dosažení velmi přesných tvarů a drsností povrchů je i v současné době tato technologie pro optickou výrobu téměř nenahraditelná.

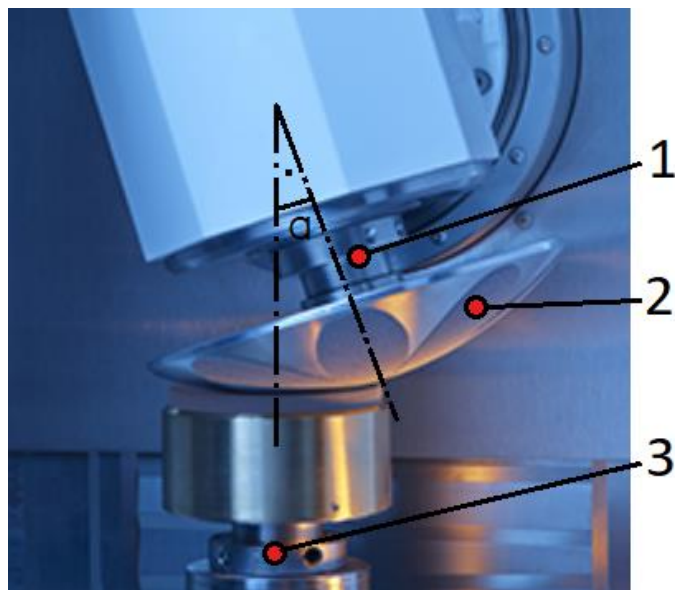


Obr. 3.10: Princip technologie autorotační kývavé kinematiky. 1 – ojnice, 2 – závaží, 3 – excentr, 4 – kyvné rameno, 5 – tryska (přívod leštiva), 6 – vodící kolík, 7 – leštící nástroj, 8 – obrobek (čočka)

3.4.2 Technologie „SynchroSpeed“

Tato technologie patří mezi nejpoužívanější CNC technologie leštění sférické optiky byla vyvinuta firmou „OptoTech“. Je to zcela produktivní technologie, která umožňuje leštit sférické povrchy za relativně krátkou dobu (5-60) minut, přičemž záleží na velikosti obrobku, požadovaných specifikacích a kvalitě předem vybroušeného povrchu. Díky této technologii dochází na celém povrchu ke konstantnímu ubírání materiálu.

Principem této technologie je, že se do spodního vřetena stroje dává objímka s pružnou membránou. Do upínacího nástroje se vkládá obrobek na leštění. Do horního vřetena se vkládá leštící nástroj. Přítlakem od stroje se pružná membrána nafoukne tlakovým vzduchem tak, že dojde k přitlačení obrobku na leštící nástroj. Obrobek a nástroj jsou poháněny do rotace přibližně stejnou rychlostí s malým rozdílem otáček pracovních vřeten. Ten malý rozdíl otáček je nutný, aby nevznikla rezonance. Mezi obrobkem a polyuretanovou podložkou leštícího nástroje se přidává leštící suspenze. Proces leštění pomocí technologie „SynchroSpeed“ je znázorněn na obr. 3.11.



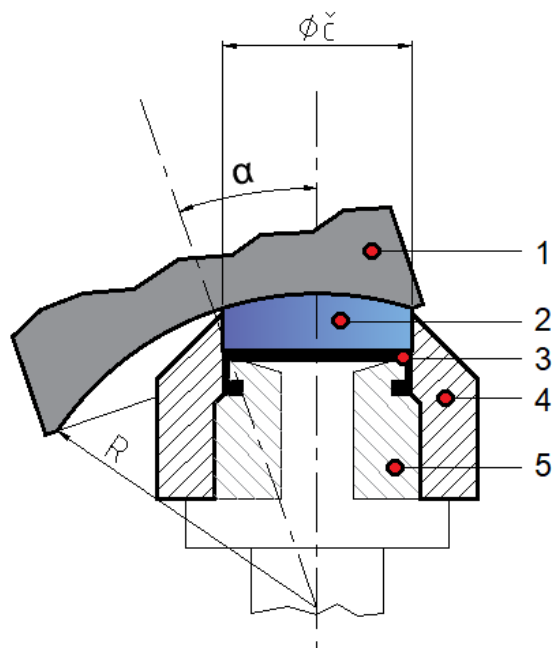
Obr. 3.11: Proces leštění technologií „SynchroSpeed“. 1 – horní vřeteno stroje, 2 – polyuretanová podložka ve tvaru kytice, 3 – spodní vřeteno stroje, α – náklon osy vřetena leštícího nástroje

Leštící nástroj většinou se vyrábí z hliníku, odpovídá negativu leštěné čočky, na kterém je nalepena polyuretanová podložka ve tvaru kytice. Tvar této polyuretanové podložky se kalibruje přímo ve stroji tzv. dresováním, které se provádí tak, že do spodního vřetena stroje se umístí diamantový nástroj hrnkového tvaru, který pod zadaným úhlem odebere (zdresuje) malou vrstvu polyuretanové podložky, a tím se změní tvar (rádius) leštícího nástroje. Leštící nástroj za rotace umožňuje také kývavý pohyb kolem středu křivosti obrobku v rovině vřeten [15]. Náklon osy vřetena leštícího nástroje vůči ose vřetena obrobku lze stanovit z obr. 3.12 pomocí vztahu (3.1):

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{\varnothing\check{c}}{2R}\right), \quad (3.1)$$

kde α (°) je náklon osy vřetena leštícího nástroje, $\varnothing\check{c}$ (mm) je průměr obrobku, R (mm) poloměr křivosti (rádius) obrobku.

Při upínání obrobku v objímce s pružnou membránou vzniká riziko poškození spodní částí obrobku (např. předem vyleštěného povrchu), proto před leštěním druhé strany je potřeba opatřit předem vyleštěný povrch ochranným lakem. Jelikož proces schnutí ochranného laku může trvat hodiny, dochází k zastavení leštění druhé strany obrobku. Řešení této problematiky bylo nalezeno vyvinutím technologie „HydroSpeed“.

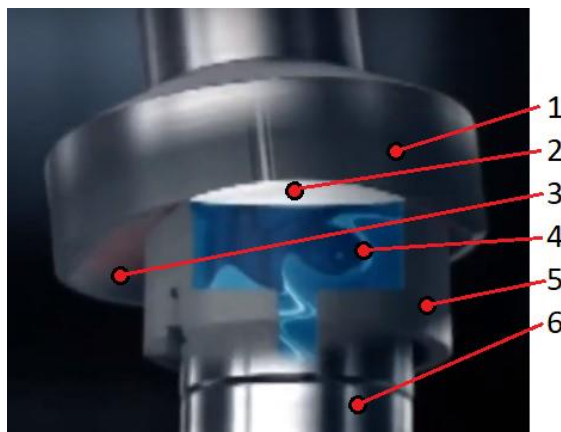


Obr. 3.12: Schéma leštění technologií „SynchroSpeed“. 1 – leštící nástroj, 2 – obrobek (čočka), 3 – pružná membrána, 4 – středící matice (objímka), 5 - vakuový upínač

3.4.3 Technologie „HydroSpeed“

Tato technologie je založena na stejném principu jako technologie „SynchroSpeed“, akorát s rozdílným způsobem přitlačování obrobku na leštící nástroj. Obrobek se přitlačuje proudem leštící suspenze, nikoli vzduchem (nafukovací membránou). Tímto způsobem obrobek leží na kapalném polštáři, a díky tomu je mechanický kontakt mezi čočkou a montážní objímkou naprosto vyloučen [15]. Přitlačování obrobku proudem leštící suspenze umožňuje absolutně rovnoměrné rozložení tlaku po celé spodní ploše obrobku, což zajišťuje výrazně menší deformace a v důsledku procesu pak vyšší přesnost leštění.

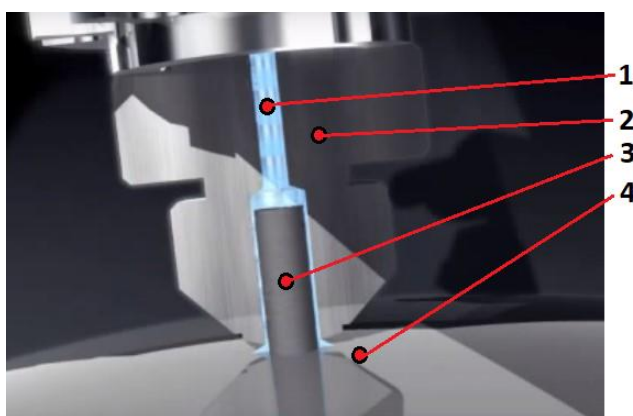
Ve srovnání s technologií „SynchroSpeed“ (kdy se přitlak obrobku na leštící nástroj provádí pneumaticky pomocí pružné membrány a vzduch zde hraje negativní roli tepelného izolátoru, proto se teplo v čočce vznikající během leštění se neodvádí, což vede k deformaci povrchu čočky) technologie „HydroSpeed: ze všech stran oplachuje čočku leštící suspenzí, jejíž teplota je udržovaná v nádrži s integrovanou regulací teploty. Leštící suspenze absorbuje teplo mnohem lépe, a tak zůstává teplotní gradient čočky konstantní. Princip leštění technologií „HydroSpeed“ je uveden na obr. 3.13.



Obr. 3.13: Princip leštění technologií „HydroSpeed”. 1 – leštící nástroj, 2 – obrobek (čočka), 3 – pracovní plocha leštícího nástroje, 4 – leštící suspenze pod tlakem, 5 – objímka (držák), 6 - spodní vřeteno stroje

3.4.4 Technologie A-FJP (Active Fluid Jet Polishing)

Tato technologie leštění umožnila provádět v CNC stroji precizní leštění jak sférických, tak povrchů asférických s přesností do $\lambda/20$. V rámci této technologie se používá leštící nástroj, který je přitlačován k povrchu obrobku aktivně řízeným náporem leštící suspenze. Výhoda této technologie spočívá v tom, že se ubírání materiálu neprovádí náporem trysky leštící suspenze, ale vzniká v důsledku kontaktu nástroje s povrchem obrobku. To znamená, že nevzniká eroze povrchu čočky, ale probíhá samotný proces leštění. Díky tomu mohou být použity standardní leštící suspenze, což je výhodné z hlediska hospodářství. Materiálem leštící podložky je většinou polyuretanová podložka. Během procesu je leštící nástroj neustále pod konstantním tlakem proudu leštící suspenze, díky čemuž je zajištěn jeho pohyb po ekvidistantě k povrchu leštěné čočky [15]. Díky překrývajícím se pohybům lze dosáhnout velmi hladkých povrchů. Na obr. 3.14 je uveden princip leštění technologií „A-FJP”.



Obr. 3.14: Princip leštění technologií „A-FJP”. 1 – leštící suspenze pod tlakem, 2 – hlava nástroje, 3 – leštící podložka, 4 – leštěný povrch obrobku

4 Požadavky na kvalitu optického povrchu a jeho měření

Optický povrch vyžaduje velmi vysokou kvalitu povrchu z technologických a funkčních důvodů. Z technologického hlediska musí být zajištěna správná návaznost drsností povrchu po jednotlivých úběrech materiálu v rámci následujících operací. Každá technologická operace jako broušení či leštění musí zajistit odstranění struktury povrchu po předchozí operaci. Hodnoty drsnosti odpovídají míře podpovrchového poškození. Z funkčního hlediska se mikronerovnosti na optickém povrchu projevují jako světlo rozptylující prvky. Pokud je vlnová délka dopadajícího světla kratší, je pak větší rozptyl světla u stejných mikronerovností povrchu. Z toho důvodu vznikají mnohem přísnější požadavky na drsnost vyleštěných optických ploch u aplikací pro krátkovlnné záření než pro běžné světlo. Zároveň musí být u optického povrchu zachována požadovaná makrogeometrie (rádius, průměr, středová tloušťka čočky apod.).

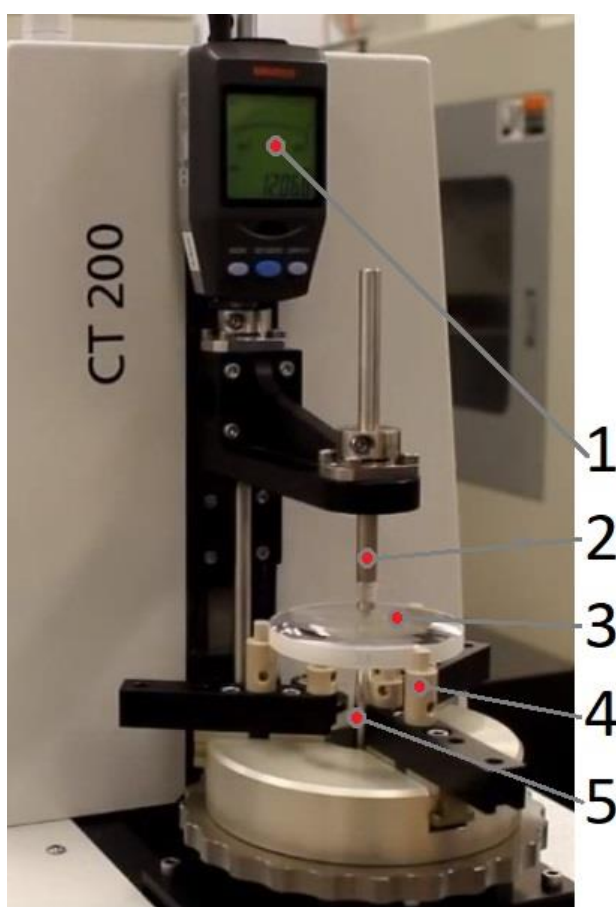
4.1 Požadavky na kvalitu broušených ploch

Kvalita broušeného povrchu je rozhodujícím parametrem pro následující (finální) operaci, tj. leštění. Kvalita se posuzuje z hlediska mikrogeometrie a makrogeometrie. Mikrogeometrie broušeného povrchu v sobě zahrnuje vyhodnocení vybroušeného povrchu bez defektů (rysek, děr) s odpovídající drsností a hloubkou podpovrchového poškození. Mikrogeometrie udává charakteristiku struktury povrchu, která je důležitá pro následné leštění. Jemnější drsnost broušeného povrchu zkracuje dobu leštění optického povrchu skla. Makrogeometrie broušeného povrchu zahrnuje geometrický tvar povrchu obrobku s optimální návazností pro následující operace leštění. Makrogeometrie je ovlivněna kinematikou stroje, tvarem nástroje a poměrem mezi velikostí nástroje a obrobku. Níže jsou uvedeny metody měření geometrie optických povrchů.

4.1.1 Měření středové tloušťky čočky

Podle způsobu měření lze měření středové tloušťky rozdělit na kontaktní a bezkontaktní. Měřením středové tloušťky čočky lze také sledovat úběr materiálu po obrábění. Pro měření úběru materiálu po broušení před započítáním broušení se měří výchozí hodnota středové tloušťky čočky a poté se hodnota úběru porovnává s předchozí hodnotou.

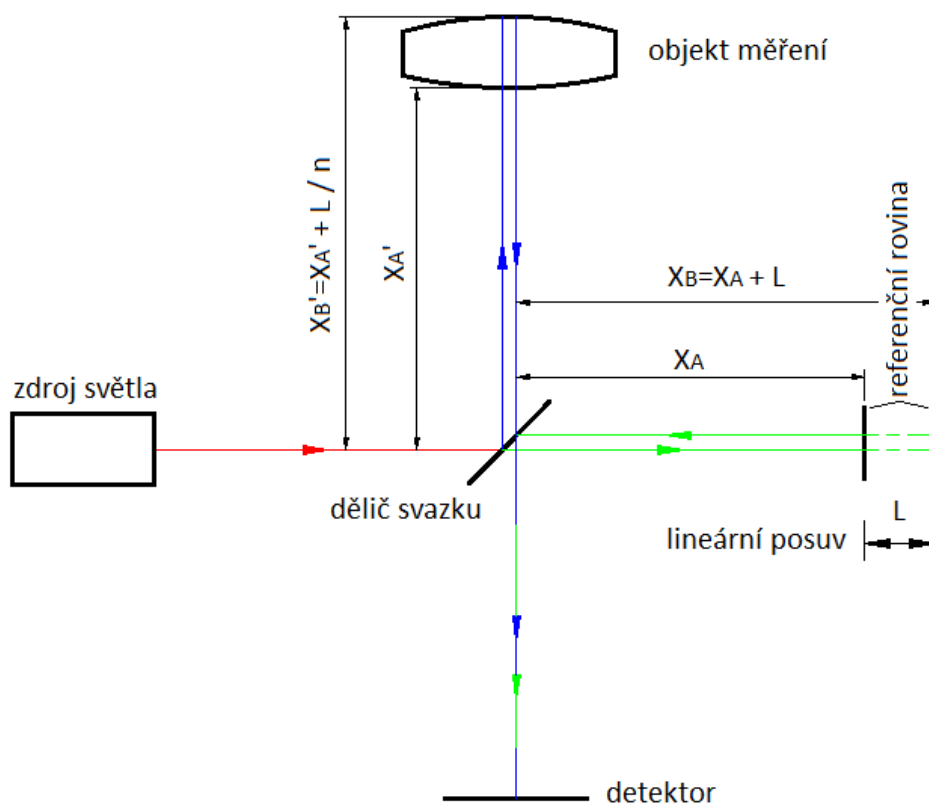
Měření středové tloušťky čočky **kontaktní metodou** se provádí hodinkami upevněnými ve stojanu (viz obr. 4.1). Při dotyku horního a dolního hrotu se hodinky vynulují. Dále se čočka vkládá do sklíčidla, které pomocí třech centrovacích kolíků čočku vycentruje. Poté se při dotyku horního a dolního hrotu s povrchem čočky vypočítá hodnota středové tloušťky čočky. Na konci hrotu je obvykle ocelová kulička, která je pro broušený povrch z hlediska poškrábání zcela bezpečná. Pro měření středové tloušťky po leštění se na konci hrotu, z důvodu zamezení poškrábání povrchu, používá rubínová kulička. Hlavní nevýhodou této metody je nutnost sundání čočky z tmelky či držáku, nutnost jejího očištění od ochranného laku a tím pádem riziko poškrábání.



Obr. 4.1: Měření středové tloušťky čočky kontaktní metodou. 1 – digitální hodinky, 2 – horní hrot, 3 – čočka, 4 – centrovací kolík, 5 – dolní hrot

Bezkontaktní metoda měření středové tloušťky je založena na nízkokoherenční interferometrii. Nízkokoherenčním zdrojem světla může být např. superluminiscenční dioda (SLD). Úzký kolimovaný svazek, vycházející ze zdroje světla se v děliči svazku rozdělí na dvě větve – referenční a objektovou (viz obr. 4.2). Referenční větev směřuje k referenční

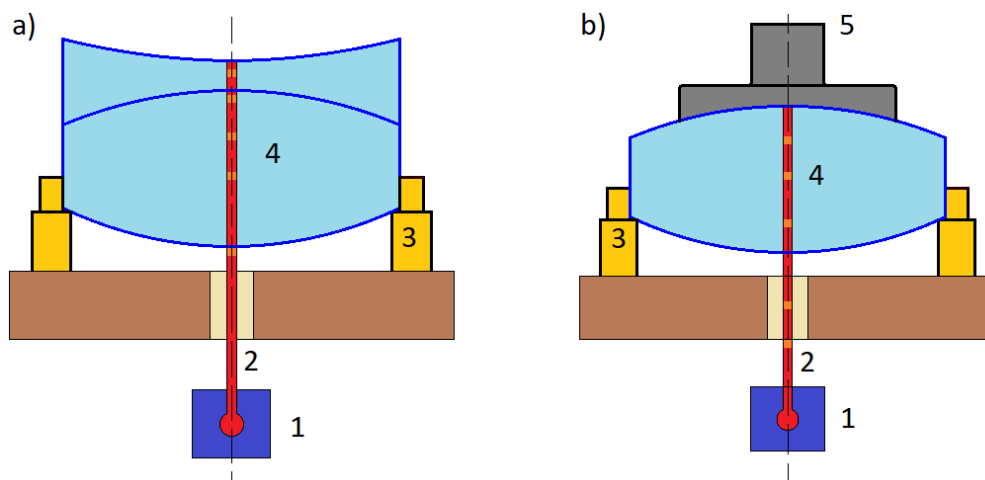
rovině, od které se část paprsků odrazí a dopadá na detektor. Objektová větev směřuje k objektu měření (např. čočka), od kterého se část paprsků odrazí a dopadá na detektor. Aby vznikla interference, musí být optická vzdálenost mezi děličem svazku a referenční rovinou (X_A , příp. X_B) stejná s optickou vzdáleností mezi děličem svazku a objektem měření (X_A' , příp. X_B'). Proto má referenční rovina lineární posuv se snímačem, který umožňuje najít body s nejvyšší amplitudou vlnění, resp. s nejlepším kontrastem interferenčních proužků. V případě měření středové tloušťky čočky se nejvyšší amplituda vlnění projeví na spodním a horním povrchu čočky. Dráhový rozdíl zaznamenaný snímačem mezi nejvyššími amplitudami vlnění, resp. mezi optimální korelační píky, odpovídá optické tloušťce čočky. Středová tloušťka čočky se pak rovná optické dráze L dělenou indexem lomu měřeného skla n [21].



Obr. 4.2 Princip bezkontaktního měření středové tloušťky

Tato technologie umožňuje absolutní vedení tloušťky jakéhokoliv materiálu, který je transparentní nebo částečně transparentní pro měření světla. Pro měření broušených povrchů se na povrch nanáší vrstva oleje pro zlepšení průhlednosti. Výhodou této metody je možnost měření soustav čoček, např. dubletů (viz. obr 4.3(a)), nebo měření přímo na tmelce (viz. obr 4.3(b)). Další výhodou je měření bez kontaktu s hrotem, které zamezuje riziku vzniku

poškrábání či jiných defektů. Nevýhodou je relativně vysoká cena ve srovnání s kontaktními měřicími přístroji.



Obr. 4.3: Schématické znázornění bezkontaktního měření středové tloušťky. a) dvojitá slepená čočka (dublet), b) čočka na tmelce. 1 – zdroj, 2 – paprsek, 3 – centrovací kolík, 4 – optický element, 5 – tmelka

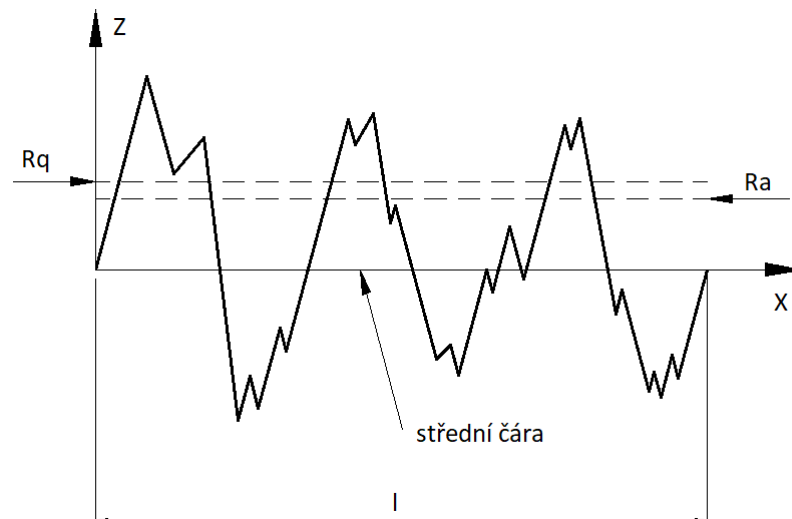
4.1.2 Měření drsnosti povrchu

Měření drsnosti povrchu je způsob hodnocení kvality povrchu. Mezi nejčastěji používané parametry sloužící k popisu drsnosti povrchu patří výškové parametry Ra a Rq (viz obr. 4.4).

Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu Ra je aritmetickým průměrem absolutních hodnot výšek profilu drsnosti vzhledem ke středové čáře (viz obr. 4.4), je vyjádřena vztahem (4.1), [10].

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(X)| dx, \quad (4.1)$$

kde $Z(X)$ je funkce popisující profil, X je úsečka profilu odečítaná na střední čáře, l je délka základního profilu.



Obr. 4.4: Výškové parametry Ra a Rq

Průměrná kvadratická odchylka posuzovaného profilu Rq je určena vztahem (4.2). V některé literatuře [10] se označuje jako RMS (root mean square či střední kvadratická odchylka). Tím, že souřadnice profilu drsnosti $Z(X)$ je ve druhé mocnině, je tento parametr mnohem citlivější ke změně výšek prohlubní či výstupků.

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l |Z^2(X)| dx}. \quad (4.2)$$

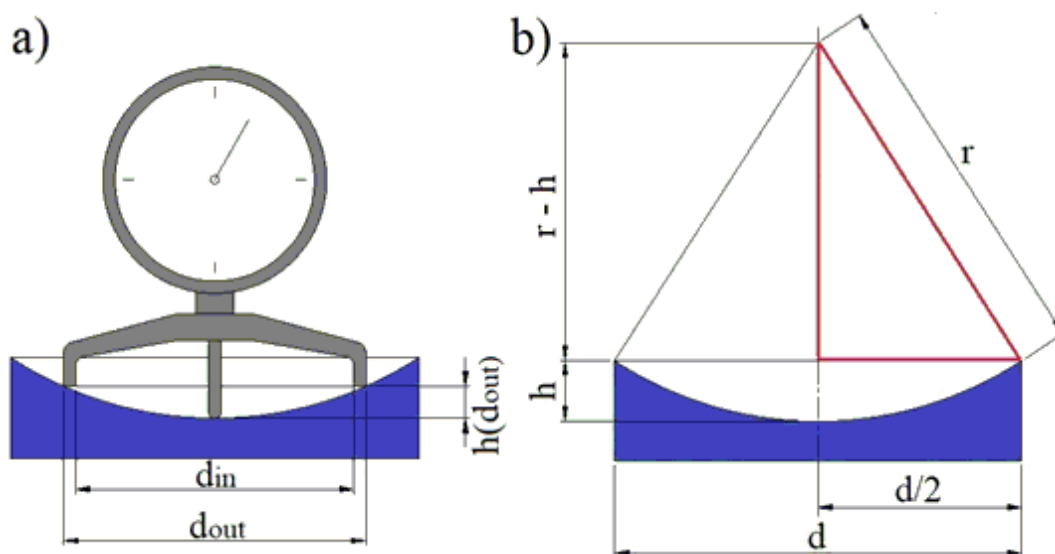
S rozvojem mikroprocesorové elektroniky vznikla široká nabídka měřidel drsnosti. Podle měřicího principu lze rozdělit měřicí přístroje na kontaktní (hrotové) a bezkontaktní (optické).

Základním prvkem **kontaktního profilometru** je diamantový hrot přesného rádiusu (zatížený určitou silou), který kopíruje profil zkoumaného povrchu posunutím po zvolené dráze. Hrot je spojen s jednotkou, která na základě vertikálního pohybu hrotu po profilu povrchu přemění na elektrický signál. Výstupem pak je profil povrchu v digitální formě. Pokud rádius hrotu bude větší v porovnání se šířkou prohlubně, pak tvar změřeného profilu nebude odpovídat skutečnému profilu.

Princip **bezkontaktního měření** drsnosti povrchu spočívá ve využití technologie interferometrie bílého světla. Tato metoda je založena na obdobném principu jako bezkontaktní metoda měření středové tloušťky, avšak dochází při ní k přesnému změření vzdálenosti v každém pixelu. Výhodou bezkontaktního měření je vysoká rychlost měření a možnost měření na citlivých materiálech.

4.1.3 Měření tvaru (rádiusu) broušených optických povrchů

V případě kontaktního měření tvaru (rádiusu) u sférických a rovinných povrchů se používají mikronové hodinky s tzv. sférometrickým kroužkem (viz obr. 4.5(a)). Hodinky se nastavují do nulové polohy po přiložení na kalibr s požadovaným rádiusem. Velikost sférometrického kroužku se volí co nejblíže průměru kontrolované plochy. Při kontrole konvexních ploch sférometrický kroužek dosedá na plochu svým vnitřním průměrem d_{in} . Při kontrole konkávních ploch sférometrický kroužek dosedá na plochu naopak průměrem vnějším d_{out} . Po nastavení hodinek na nulovou hodnotu se hodinky přiloží na kontrolovanou plochu a odečte se výška vrchlíku h . Ze známé hodnoty průměru kroužku d vypočítáme rádius r měřené plochy podle vzorce (4.3), který vychází dle Pythagorovy věty z trojúhelníku (viz obr. 4.5(b)). Hodnoty přípustných odchylek rádiusu jsou stanoveny v technologickém postupu výrobku podle výkresových požadavků.



Obr. 4.5: Princip výpočtu rádiusu sférického povrchu. a) měření rádiusu sférometrickým kroužkem, b) schématické znázornění odvození rádiusu. d_{in} je vnitřní průměr kroužku, d_{out} je vnější průměr kroužku, $h(d_{out})$ je výška vrchlíku na vnějším průměru kroužku, r je rádius čočky, h je výška vrchlíku čočky, d je průměr čočky

$$r^2 = \left(\frac{d}{2}\right)^2 + (r - h)^2, \quad (4.3)$$

Pro výpočet výšky vrchlíku čočky h lze vztah (4.3) upravit na:

$$h = r - \sqrt{r^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2} \quad (4.4)$$

Vztah pro výpočet rádiusu čočky r ze známé výšky vrchlíku čočky h lze vyjádřit ze vztahu (4.3) jako:

$$r = \frac{d^2 + (4 \cdot h^2)}{8 \cdot h} \quad (4.5)$$

4.2 Požadavky na kvalitu leštěných ploch

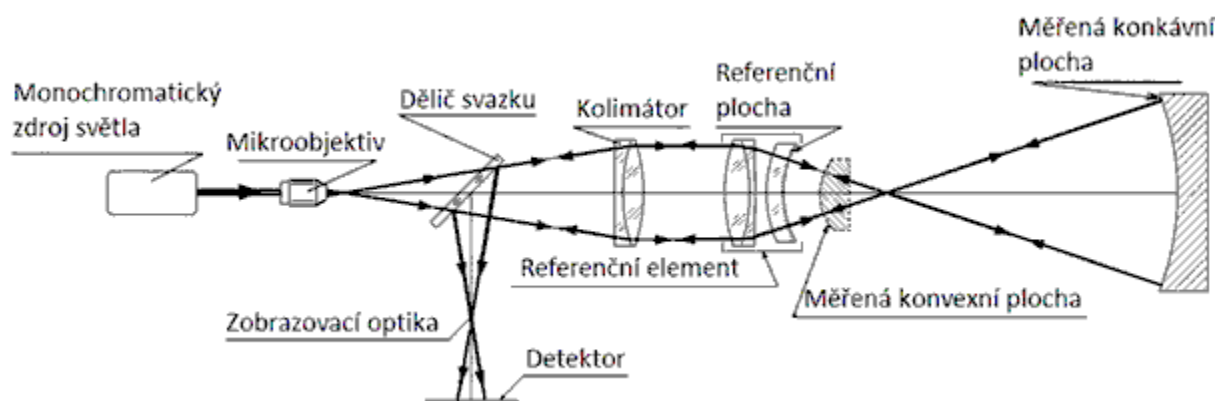
Leštění je konečnou úpravou tvaru optické plochy. Leštěním získává optický díl hladký, průhledný a lesklý povrch a také správný tvar optické plochy splňující požadavky dané výkresovou dokumentací.

4.2.1 Měření tvaru leštěných optických povrchů

Pro měření tvaru a nerovností (defektů) leštěného optického povrchu se používají **interferometry**. Interferometry jsou přístroje pro velmi přesná měření. Princip interferometru je založen na interferenci světla tak, že paprsek elektromagnetického záření je prostorově rozdělen na dva nebo více koherentních paprsků. Každý z paprsků prochází různými optickými dráhami a před dopadem na detektor spolu interferují, čímž se vytváří interferenční obrazec, ze kterého lze stanovit fázový rozdíl interferujících paprsků. V dnešní době je pro měření tvaru optických povrchů nejčastěji používán Fizeau interferometr, na němž byl proveden experiment popsáný v následující kapitole.

Fizeau interferometr je dvousvazkový interferometr, který se využívá pro měření rovinných a sférických povrchů. Referenční element lze jednoduše měnit. Je odlišný od ostatních interferometrů zejména větší vzduchovou mezerou mezi referenčním elementem a měřenou plochou. Schéma Fizeau interferometru pro měření sférických povrchů je znázorněno na obr. 4.6. Monochromatický zdroj světla se zaostří přes mikroobjektiv a přemění se na rozbíhavý svazek paprsků, který se po průchodu děličem svazku přemění pomocí kolimátoru na rovnoběžný svazek. Pro měření rovinných a sférických povrchů se používá referenční element – objektiv. Referenční plocha objektivu je etalonem. Objektiv je umístěn za kolimátorem a měřená plocha se umísťuje za objektivem tak, aby se její střed zakřivení

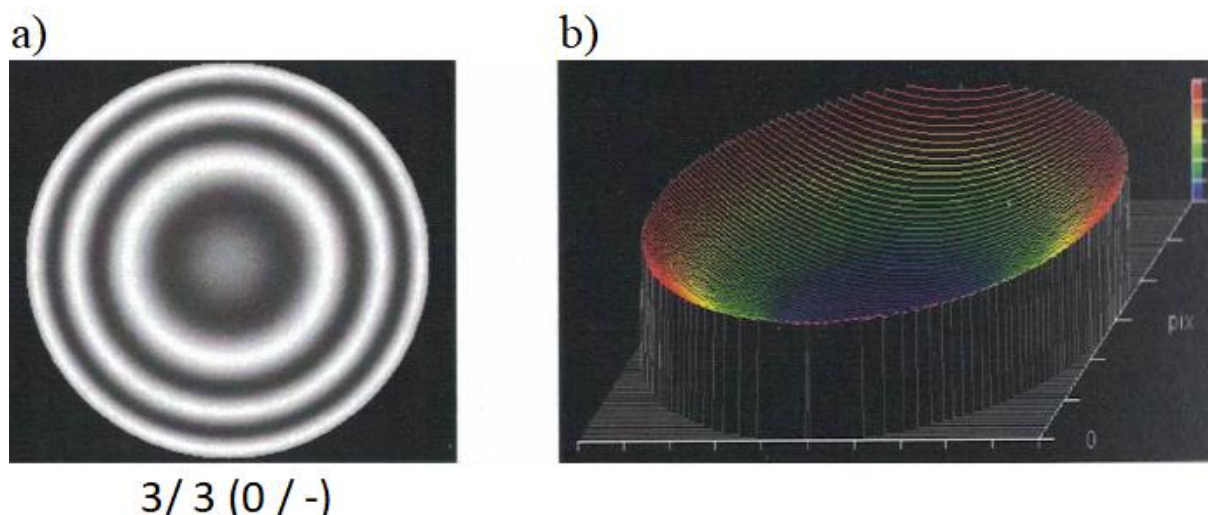
shodoval s ohniskem referenčního elementu (objektivu). Odražený od referenčního a měřeného povrchu se svazek paprsků vrací zpět přes kolimátor a následně odražením od děliče svazku vytváří interferenční obrazec, ze kterého lze stanovit fázový rozdíl interferujících paprsků [19].



Obr. 4.6: Schéma Fizeau interferometru pro měření sférických povrchů

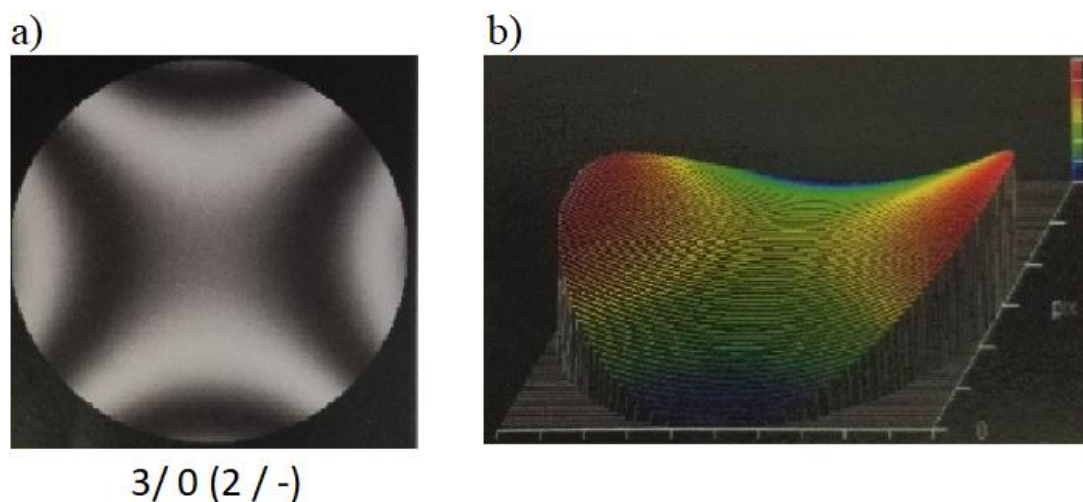
Tolerance tvaru optické plochy se na optickém výkresu označuje podle normy ISO 10110-5 kódovým číslem $3/A (B / C)$, např. $3/3 (2 / 1)$. Tyto hodnoty se určují na interferometru ve formě interferenčních proužků. Jeden interferenční proužek se rovná $\lambda/2$, což např. pro červené světlo laseru o vlnové délce $\lambda = 632,8 \text{ nm}$ znamená $632,8 \text{ nm} / 2 = 316,4 \text{ nm}$. V případě výkresové tolerance číslo 3 udává odchylku ve formě třech interferenčních proužků od předepsaného rádiusu; číslo 2 odpovídá odchylce od symetrie jako dva interferenční proužky; číslo 1 odpovídá hodnotě rotačně symetrických odchylek jako jeden interferenční proužek. Níže je uveden rozbor daných tolerancí tvaru, resp., co znamenají jednotlivá písmena kódového čísla [10]:

A („Power error“) – je maximálně přípustná chyba výšky vrchlíku. Je odchylkou mezi skutečným rádiusem a rádiusem předepsaným výkresem, která je daná počtem interferenčních proužků. Na obr. 4.7(a) je uveden interferenční obrazec, na kterém je vidět odchylku od předepsaného rádiusu v hodnotě třech interferenčních proužků. Na obr. 4.7(b) je izometrické zobrazení profilu.



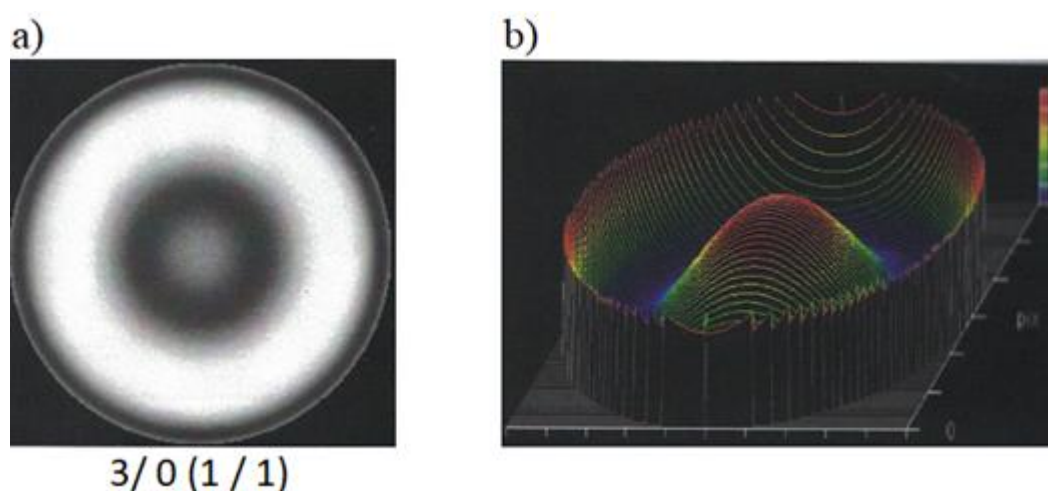
Obr. 4.7: Interferenční obrazec se znázorněnou chybou výšky vrchlíku A. a) interferenční obrazec, b) izometrické zobrazení profilu

B („Irregularity error“) – je maximálně přípustná chyba irregularity (nepravidelnosti). Popisuje všechny odchylky po odečtení nejlepší sféry ve formě astigmatismu, komy apod. Na obr. 4.8(a) je uveden interferenční obrazec, na kterém je znázorněna chyba irregularity ve formě astigmatismu v hodnotě dvou interferenčních proužků. Na obr. 4.8(b) je ukázáno izometrické zobrazení profilu.



Obr. 4.8: Interferenční obrazec se znázorněnou chybou irregularity **B** ve formě astigmatismu. a) interferenční obrazec, b) izometrické zobrazení profilu

C („Rotationally symmetric irregularity“) – je maximálně přípustná hodnota rotačně symetrické irregularity. K těmto odchylkám patří především kopec, dolík nebo strhaný okraj čočky. Takovéto odchylky v optickém systému mají vliv na sférickou aberaci. Vyhodnocení odchylek tohoto typu se provádí při odstranění chyby výšky vrchlíku **A**, tj. nastavením vzdáleností mezi referenčním a zkoumaným povrchem na nulovou hodnotu. Na obr. 4.9(a) je uveden interferenční obrazec, na kterém je znázorněna rotačně symetrická irregularita ve tvaru kopce uprostřed v hodnotě jednoho interferenčního proužku. Na obr. 4.9(b) je zobrazeno izometrické zobrazení profilu.



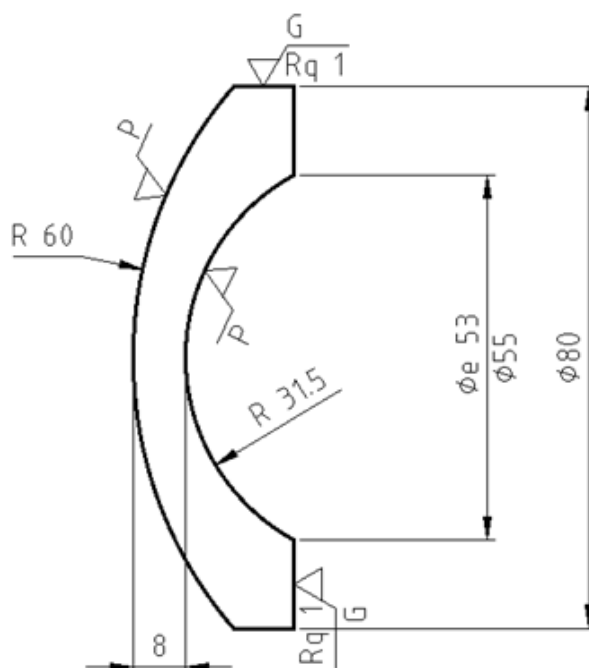
Obr. 4.9: Interferenční obrazec se znázorněnou rotačně symetrickou irregularitou **C**. a) interferenční obrazec, b) izometrické zobrazení profilu

5 Praktická část

Vzhledem k vyskytujícím se problémům při deformování tvaru natmelených čoček bylo rozhodnuto provést experiment, který by umožnil vyšetřit průběh deformace tvaru na jednotlivých tmelkách. Cílem tohoto experimentu bylo zjistit vliv různých typů tmelek na změnu tvaru povrchu čočky při tepelném namáhání. Dalším cílem bylo provést simulace v softwaru MSC.Marc/Mentat pro potvrzení získaných výsledků.

5.1 Experiment

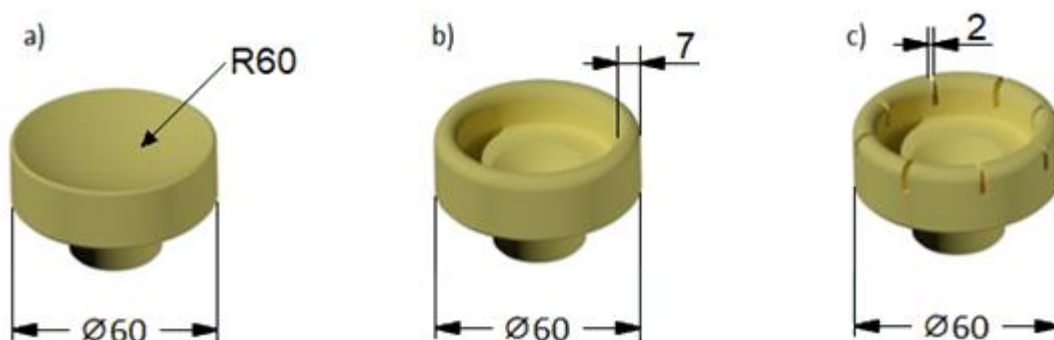
Experiment byl proveden na konvex-konkávni čočce, jejíž konkávní povrch je uzavřen téměř do hemisféry, viz obr. 5.1. Důraz byl kladen na konkávní povrch čočky z důvodu obtížnosti leštění tohoto povrchu do požadovaných specifikací. Na uzavřených površích je také jednodušší sledování deformace tvaru kvůli jeho uzavřenosti. U konkrétních typů konstrukce tmelky se očekávala změna tvaru povrchu čočky ve formě zkroucení povrchu do astigmatismu nebo vytlačování, resp. prohnutí prostřední části čočky.



Obr. 5.1: Geometrie konvex-konkávni čočky. Všechny rozměry jsou v mm.

Byly zvoleny tři druhy tmelek – rádiusová plošná tmelka, hrnková tmelka celistvá a hrnková tmelka segmentovaná (obr. 5.2). Všechny tyto tmelky byly vyrobeny z mosazi o vnějším průměru $\varnothing 60$ mm. Zvolená čočka byla vyrobena z optického skla typu „S-FPM3“, které je velmi citlivé vůči změnám teplot. Z tohoto důvodu byl pro natmelení čočky na tmelku

zvolen červený vosk, který je vyroben z včelího vosku a terpentýnu smíchaného v poměru 5:1. Bod tuhnutí tohoto vosku je cca 45 °C (tento bod není uváděn výrobcem, proto byl zjištěn experimentálně). Čočka a tmelka se zahřívaly v troubě na teplotu 60 °C po dobu 30 minut, aby došlo k jejich prohřátí a bylo možné na ně nanést vosk. Červený vosk se poté nanášel na zahřátou tmelku a přirozeně se roztavoval. Proces vychladnutí probíhal při pokojové teplotě 22 °C cca 5 hodin tak, aby zabránilo vzniku náhodných deformací.



Obr. 5.2: Druhy použitých tmelek. a) rádiusová plošná tmelka, b) hrnková tmelka celistvá, c) hrnková tmelka segmentovaná

Experiment se prováděl na dvou čočkách o stejné geometrii (dále čočka 1 a čočka 2), u kterých byl povrch už před začátkem experimentu vyleštěn do požadovaných specifikací. Měření povrchu bylo provedeno na Fizeau interferometru ve třech etapách – před tmelením, na tmelce, po sundání z tmelky. Poloha čočky při měřeních na interferometru byla zachována.

Obě čočky byly na začátku vybroušeny na CNC stroji. Při broušení konvexní plochy čočky byl zvolen způsob uchycení přísáváním. Konkávní plocha se brousila na tmelce, protože vyžadovala přesnější specifikace. Leštění konvexního povrchu bylo provedeno technologií „HydroSpeed“. Konkávní povrch byl leštěn technologií „SynchroSpeed“ a následně dolešťován do požadovaných specifikací pomocí technologie autorotační kývavé kinematiky za použití tmelky. Popis výrobních technologií je uveden v kapitole 4.

Na interferometru byla sledována hodnota irregularity (označovaná písmenem **B**) a hodnota rotačně symetrické irregularity (označovaná písmenem **C**). Změna rádiusu (označovaná písmenem **A**) nebyla vyhodnocována z důvodu zanedbatelnosti.

Na obr. 5.3 jsou ukázány výsledky měření tvaru konkávní plochy získané z interferenčních obrazců pro čočku 1. Vyhodnocení odchylek tvaru povrchu bylo provedeno

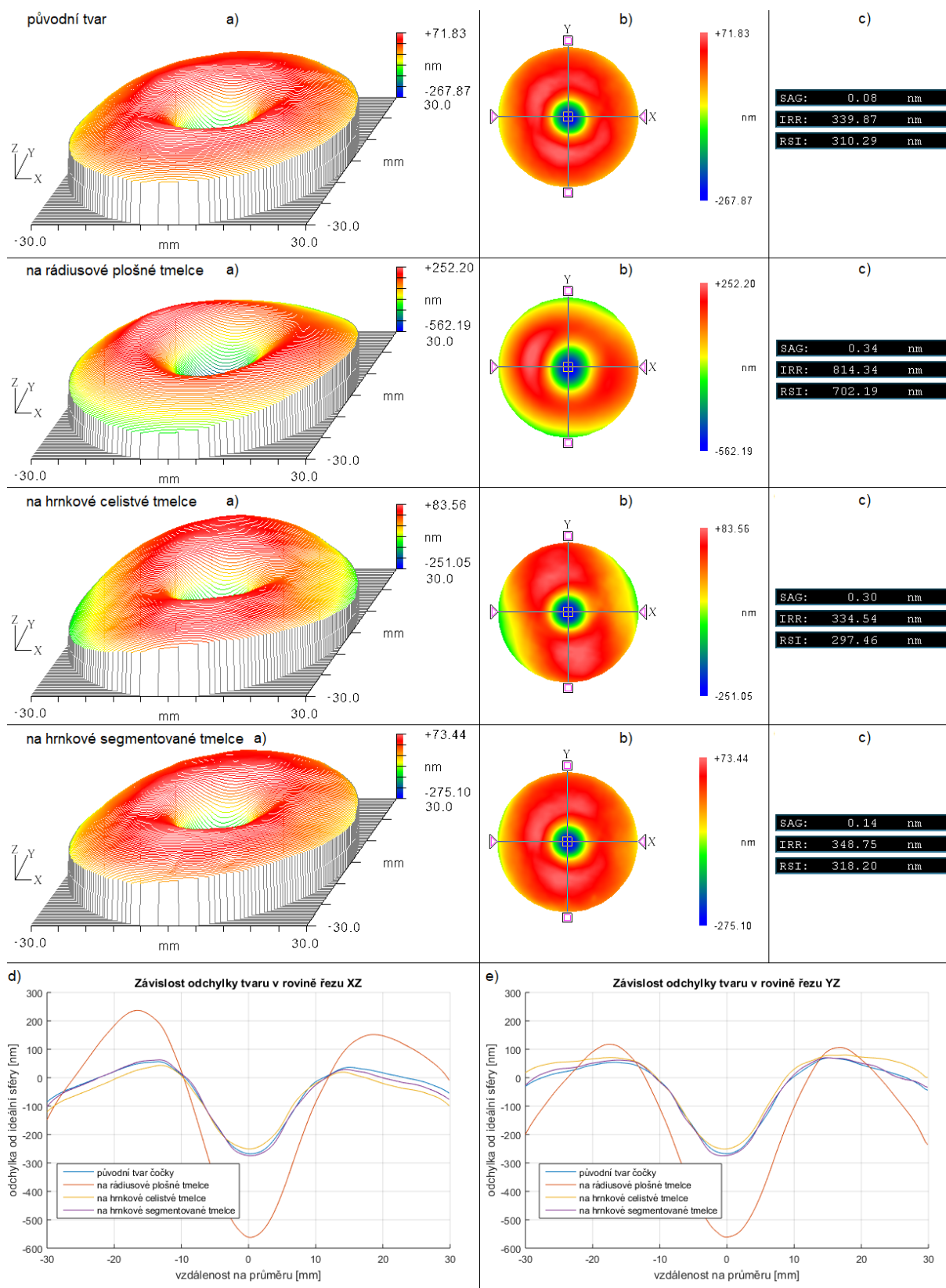
pomoci metrologického softwaru Zygo MetroPro. Pro pohodlnější vyhodnocování byly všechny hodnoty převedeny z interferenčních proužků na nanometry.

Na obr. 5.4 jsou výsledky měření tvaru konkávní plochy získané z interferenčních obrazců pro čočku 2.

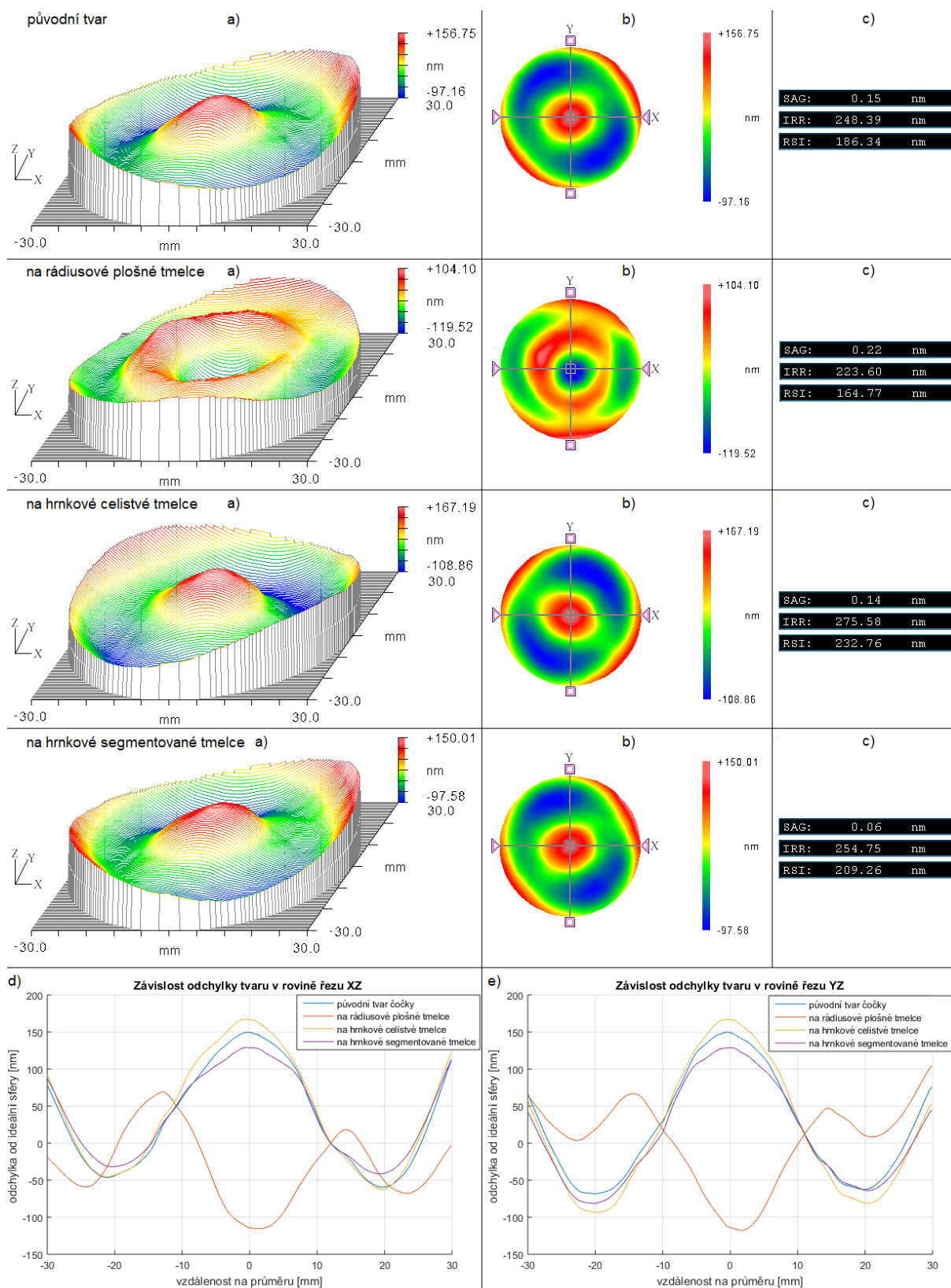
Z obr. 5.3 a 5.4 se podařilo vysledovat určité tendence, které se projevily na jednotlivých tmelkách. Tak na povrchu čočky natmeleným na plošnou rádiusovou tmelku se výrazně prohnula prostřední část čočky a vznikl dolík, což se prokázalo na rotačně symetrické iregularitě (**C**). Obzvláště je pak daný průběh vidět na obr. 5.4, neboť čočka 2 měla již před tmelením mírný kopec uprostřed čočky, který se po natmelení na plošnou rádiusovou tmelku přeměnil na dolík. Lze konstatovat, že tmelky plošného typu projevují tendenci deformovat tvar čočky s vytvořením dolíku uprostřed plochy.

Tmelky hrnkového typu mají tendenci spíše kroutit tvar plochy do astigmatismu. To má pak vliv na iregularitu (**B**), avšak rotačně symetrická iregularita (**C**) je zachována bez výrazných změn. Pozorování této tendence je dobře vidět při izometrickém zobrazení profilu, avšak v rovinách řezů XZ a YZ to není zřejmé. V praxi se většinou iregularita posuzuje buď přímo z interferenčního obrazce, nebo z numericky vypočtených hodnot (obr. 5.3 (c) a 5.4 (c)).

Segmentované tmelky hrnkového typu nemají zkroucení tvaru plochy příliš výrazné. Segmentace hrnku tmelky napomáhá vyrovnat a zároveň snížit napětí vznikající při ohřevu. Tvar plochy na tomto typu tmelek ukázal nejmenší rozdíl hodnot iregularity a rotačně symetrické iregularity oproti hrnkové celistvé tmelce. Lze proto předpokládat, že tento typ tmelek je nejlepší a je tedy možné tmelky segmentovaného typu doporučovat při tmelení.



Obr. 5.3: Výsledky měření tvaru konkávní plochy pro čočku 1. a) izometrické zobrazení profilu, b) znázornění os řezu, c) vypočítané hodnoty specifikací, d) porovnání výsledků v rovině řezu XZ, e) porovnání výsledků v rovině řezu YZ



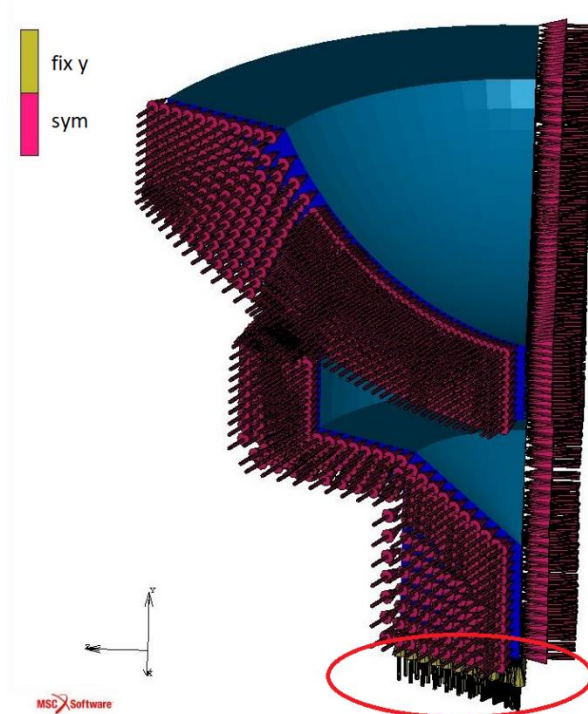
Obr. 5.4: Výsledky měření tvaru konkávní plochy pro čočku 2. a) izometrické zobrazení profilu, b) znázornění os řezu, c) vypočítané hodnoty specifikací, d) porovnání výsledků v rovině řezu XZ, e) porovnání výsledků v rovině řezu YZ

5.2 Numerická simulace

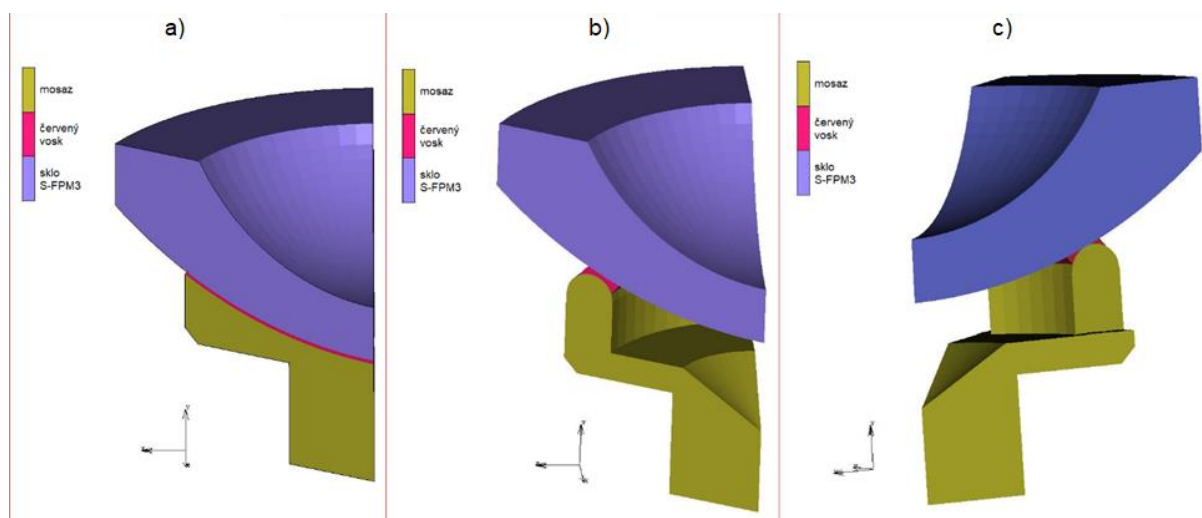
Pro provedení numerické simulace byl zvolen software MSC.Marc/Mentat 2010, obsahující jak řešič MSC.Marc, založený na metodě konečných prvků, tak pre a post procesor MSC.Mentat. Důvodem volby tohoto softwaru byla možnost simulace viskoelastického chování materiálu, což je v tomto případě nezbytné (tmel se chová jako viskoelastický materiál). Níže je popsána tvorba simulačního modelu.

Tvorba modelu se řešila jako symetrická úloha. Model byl tvořen výřezem tělesa (segment 45°) získaného pomocí dvou rovin symetrie, které procházejí osou rotace. V rovinách řezu byly definovány symetrické okrajové podmínky (v obr. 5.5 označeno pomocí růžových šipek). Protože tmelka je velmi tuhá, byly všechny body spodní plochy zafixovány v ose Y (v obr. 5.5 označeno elipsou). Počáteční teplota tmelky a čochky byla 60 °C. Okrajovou podmínkou byl konvektivní přenos tepla. Modré plochy na obr. 5.5 jsou definovány pomocí přestupu tepla při teplotě okolí 22 °C, kdy byl zadán součinitel přestupu tepla $\alpha = 25 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$.

Na stejném principu byly vytvořeny celkem tři modely odpovídající třem různým tmelkám (obr. 5.6).



Obr. 5.5: Znázornění okrajových podmínek modelu



Obr. 5.6: Geometrie vytvořených modelů. a) model s rádiusovou plošnou tmelkou, b) model s hrnkovou celistvou tmelkou, c) model s hrnkovou segmentovanou tmelkou

Níže jsou uvedeny materiálové vlastnosti, které byly použity při vytvoření simulačního modelu:

Tab. 1: Materiálové vlastnosti optického skla „S-FPM3“

Materiál	Optické sklo „S-FPM3“
Hustota ρ [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]	3640
Youngův modul pružnosti E [MPa]	80600
Poissonova konstanta μ	0,291
Teplotní součinitel roztažnosti α [K^{-1}]	$1,15 \cdot 10^{-5}$
Tepelná kapacita $C_p(20^\circ\text{C})$ [$\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]	0,8
Tepelná vodivost λ [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]	0,805

Tab. 2: Materiálové vlastnosti mosazi

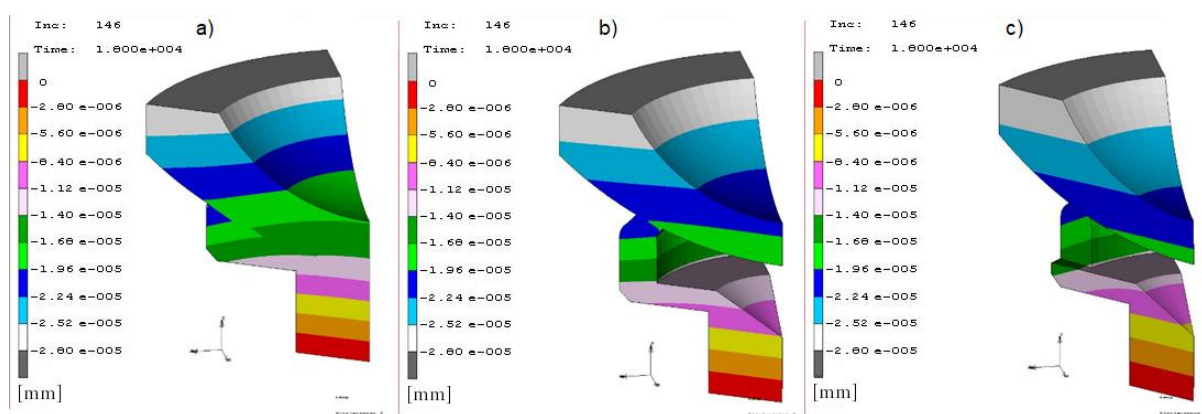
Materiál	Mosaz
Hustota ρ [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]	8525
Youngův modul pružnosti E [MPa]	97000
Poissonova konstanta μ	0,31
Teplotní součinitel roztažnosti α [K^{-1}]	$1,87 \cdot 10^{-5}$
Tepelná kapacita C [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]	380
Tepelná vodivost λ [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]	109

Tab. 3: Materiálové vlastnosti červeného vosku

Materiál	Červený vosk [20]
Hustota ρ [kg · m ⁻³]	970
Youngův modul pružnosti E [MPa]	1000
Poissonova konstanta μ	0,35
Teplotní součinitel roztažnosti α [K ⁻¹]	$1 \cdot 10^{-5}$
Modul pružnosti ve smyku G [MPa]	110
	160
	100
Relaxační doba t_r [s]	140
	1000
	2000
Termoreologicky jednoduché parametry	
Referenční teplota T_r [°C]	45
Konstanta $C_1(T_r)$	6
Konstanta $C_2(T_r)$	101,6

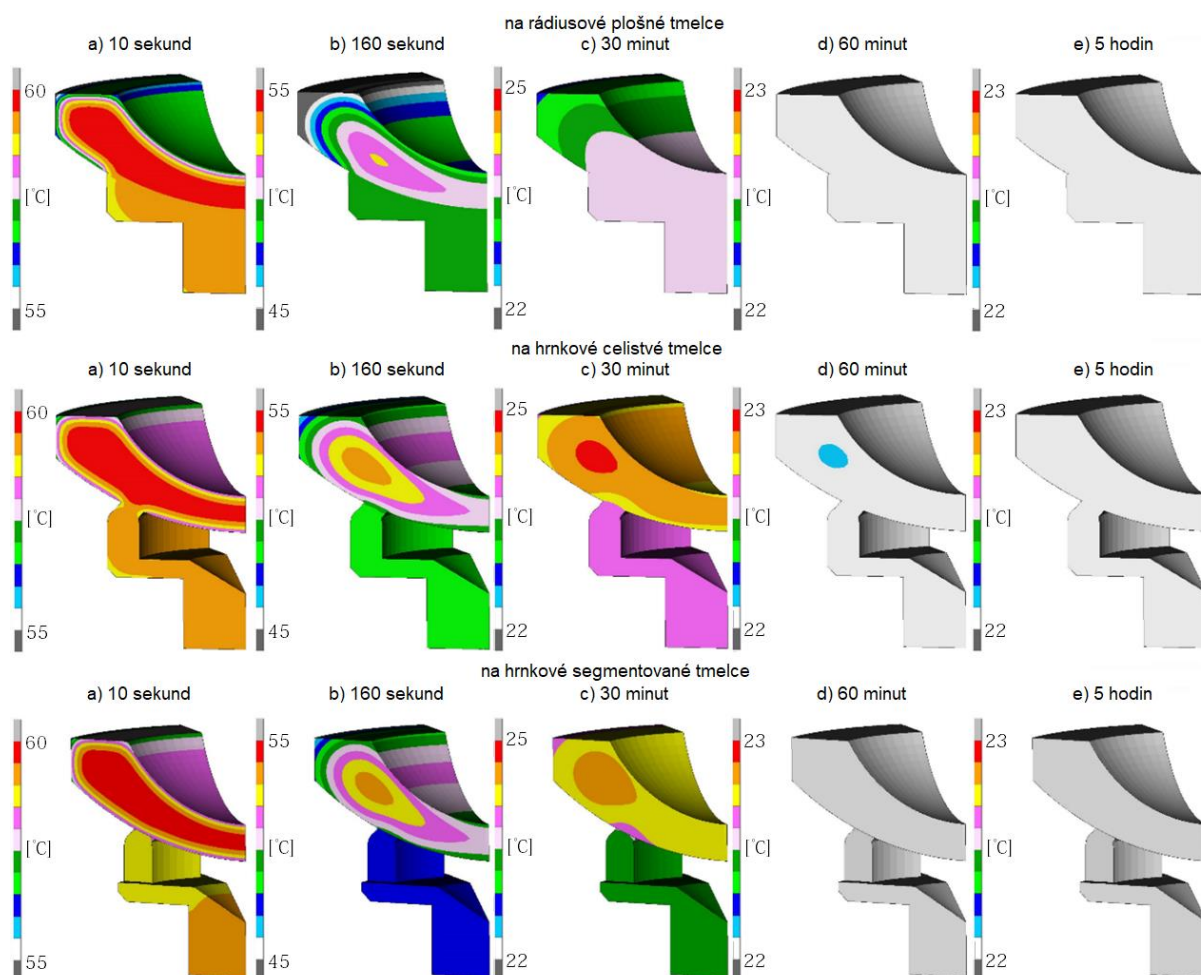
Červený vosk je izotropním viskoelastickým materiálem. Viskoelastické materiály jsou citlivé vůči změnám teploty a charakterizují se termoreologicky jednoduchými parametry. Použití takovýchto univerzálních parametrů umožňuje odhadnout teplotní závislost červeného vosku tím, že bude známá viskozita při určité referenční teplotě T_r . Konstanty C_1 a C_2 závisí na referenční teplotě T_r a považují se za univerzální konstanty.

Dále proběhl nestacionární výpočet. Na obr. 5.7 je ukázána deformace tělesa po půl hodině, což demonstruje chování modelu jako tělesa.



Obr. 5.7: Deformace tělesa po půl hodině. a) na rádiusové plošné tmelce, b) na hrnkové celistvé tmelce, c) na hrnkové segmentované tmelce

Poté byl sledován průběh ochlazování. Na obr. 5.8 jsou znázorněny teplotní pole v časech: 10 sekund, 160 sekund, 30 minut, 60 minut, 5 hodin. To simuluje proces ochlazování z 60 °C na 22 °C. Sada těchto obrázků ukazuje nestacionárnost tohoto děje, kdy se teploty během určitých časů mění.

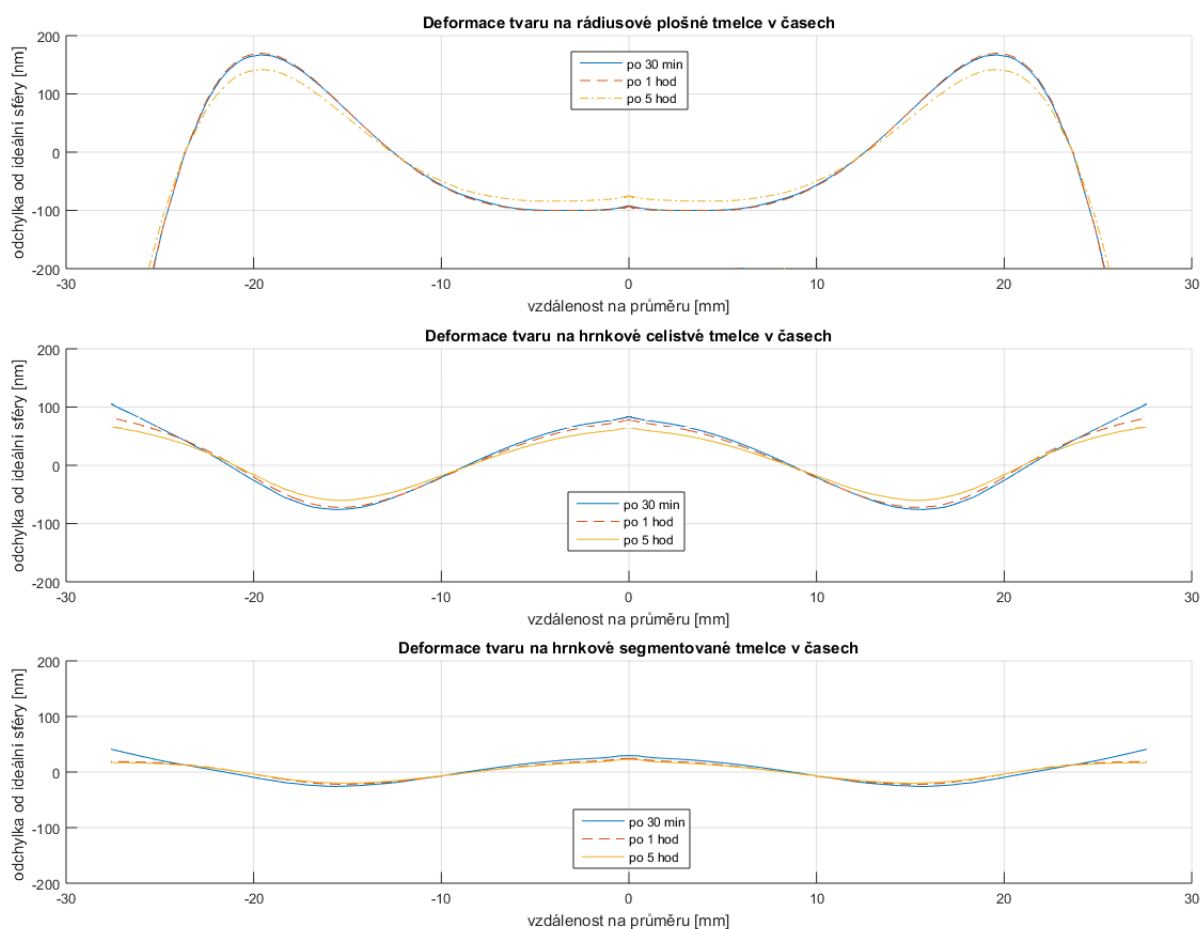


Obr. 5.8: Teplotní poli v časech

Dalším bodem bylo vyhodnocení získaných výsledků, aby bylo možné porovnat s výsledky získanými z interferometru. Složitost vyhodnocování spočívala v tom, že software MSC.Marc/Mentat, stejně jako většina softwarů pro numerickou simulaci, těžko pracuje v přesnostech menších než mikron a vznikají tak problémy s geometrií modelu. Vzdálenost množiny bodů od středu v případě numerického výpočtu není všude rovna poloměru. Řešením tak bylo ze získané množiny bodů vytvořit „Best Fit“ kružnice a vypočítat jejich rádius. Vypočtený rádius téměř korespondoval původně zadanému rádiusu s nepatrnou odchylkou 0,4 mikronu. Poté byla vypočtena odchylka jednotlivých bodů deformovaného

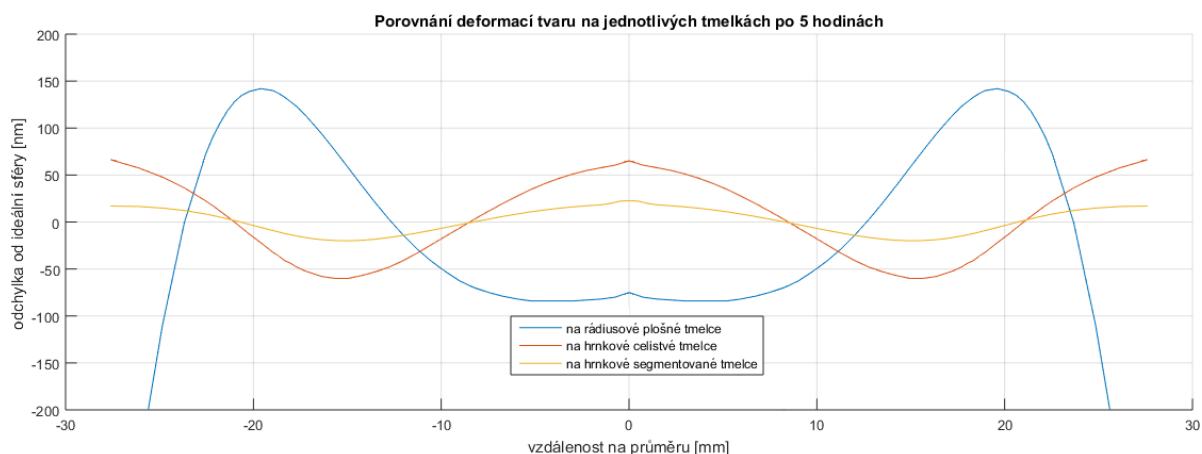
stavu od ideálního (původního) stavu a následně pak vypočtena odchylka od „Best Fit“ kružnice.

Výpočtový záznam byl proveden ve třech stavech. První stav odpovídá 1800 sekund (30 min), druhý stav - 3600 sekund (1 hod), třetí stav – 18000 sekund (5 hod). Z obr 5.8 je vidět, že už po 30 minutách je teplota všude vyrovnána, přesto je na obr. 5.9 vidět ustálení a snahu vyrovnat tvar povrchu čočky. Proto je důležité nechat teplotu čočky a tmelky ustálit (a najít tak kompromis mezi dobou ustálení a výrobní produktivitou).



Obr. 5.9: Průběh deformace tvaru na jednotlivých tmelkách

Na obr. 5.10 je znázorněno porovnání průběhů deformací tvaru na jednotlivých tmelkách po 5 hodinách.



Obr. 5.10: Porovnání průběhů deformací tvaru na jednotlivých tmelkách po 5 hodinách

Obr. 5.10 názorně ukazuje směr deformace tvaru a jejich mohutnost. Z tohoto obrázku je patrné, že rádiusová plošná tmelka způsobuje prohnutí prostřední části čočky a tzv. „stržené“ okraje“, stejně jako bylo pozorováno v experimentu. Také je dobře vidět nevýraznost deformace tvaru na hrnkové segmentované tmelce oproti hrnkové celistvé tmelce, což se shoduje s experimentem.

V numerické simulaci je nutně počítat s řadovou nepřesností, kterou ovlivňuje neznámé vlastnosti materiálu použitého tmelu. Přesto by však trend průběhů deformací měl odpovídat skutečnosti.

6 Závěr

Tato diplomová práce byla zaměřena na zkoumání vlivu teploty při výrobě optických ploch. Během vypracování této práce byly získány znalosti jak v oboru přenosu tepla, tak v oboru optiky. Byly zjištěny základní zákonitosti týkající se technologie výroby optických elementů, proběhlo seznámení se s vyskytující problematikou chování optických skel při výrobě a bylo provedeno experimentální určení teplotního namáhání při tmelení čočky.

Pro určení teplotního namáhání byla zvolena technologie tmelení čoček, kde byl zkoumán vliv různých typů tmelek na změnu tvaru povrchu čočky při tepelném namáhání. Byly zvoleny tři různé typy tmelek: rádiusová plošná, hrnková celistvá a hrnková segmentovaná tmelka. Měření zkoumaných optických povrchů se provádělo na Fizeau interferometru, kde byly zaznamenány průběhy deformací tvaru čoček, které se projeví při použití různých tmelek. Tak na povrchu čočky natmelené na plošnou rádiusovou tmelku se projeví tendence deformovat tvar čočky s vytvořením dolíku uprostřed plochy a tzv. „stržené“ okraje. Na hrnkových celistvých tmelkách se projeví tendence kroužit tvar čočky do astigmatismu. Na hrnkových segmentovaných tmelkách pak zkroucení tvaru plochy nebylo příliš výrazné oproti hrnkovým celistvým tmelkám. Segmenty totiž umožnily dilataci tmelky při zahřívání. Tvar plochy na tomto typu tmelek ukázal nejmenší rozdíl hodnot iregularity a rotačně symetrické iregularity.

Pro porovnání výsledků z experimentů byla provedena numerická simulace v softwaru MSC.Marc/Mentat. Průběhy deformací tvaru optické plochy získané z numerické simulace se výborně shodly s výsledky experimentu. Lze říci, že hrnkové segmentované tmelky ukázaly nejmenší deformace tvaru optické plochy a je tak možné tyto tmelky doporučovat při tmelení.

Možnosti dalšího výzkumu

Pro další výzkum je možné zkoumat materiály tmelek a další konstrukční řešení.

Dále je možné zkoumat chování čočky při technologii přisávání, tj. pomocí technologie vakuového přisávání.

Použitá literatura

- [1] YEFREMOV, A., SALNIKOV Y. *Izgotovlěniě i kontrol optičeskich dětalěj*. Izdatělstvo „Vysšaja škola“, 1982.
- [2] Aspheric lens. *Wikipedia*. [online]. 23.4.2019 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Aspheric_lens
- [3] Cylindrical lens. *Wikipedia*. [online]. 23.4.2019 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Cylindrical_lens
- [4] Aspheric lens. *Wikipedia*. [online]. 23.4.2019 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Aspheric_lens
- [5] Spherical aberration. *Wikipedia*. [online]. 23.4.2019 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Spherical_aberration
- [6] Coma (optics). *Wikipedia*. [online]. 23.4.2019 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Coma_\(optics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Coma_(optics))
- [7] Abbildungsfehler. *Wikipedia*. [online]. 23.4.2019 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <https://de.wikipedia.org/wiki/Abbildungsfehler>
- [8] Astigmatism (optical systems). *Wikipedia*. [online]. 23.4.2019 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Astigmatism_\(optical_systems\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Astigmatism_(optical_systems))
- [9] Chromatic aberration. *Wikipedia*. [online]. 23.4.2019 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Chromatic_aberration
- [10] SCHUBERT, I. *Wissensspeicher Feinoptik*, 17th ed.; I. Schubert: Apolda, Germany, 2017. ISBN 978-3-00-046972-5.
- [11] ROŠKA, R. *Technologie výroby skla 2*. [online]. 23.4.2019 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <http://ads.fmk.utb.cz/Contexts/atelier/Documents/Technologie%20v%C3%BDroby%20skla%202.pdf>
- [12] Vedení tepla. *Wikipedia*. [online]. 23.4.2019 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Veden%C3%AD_tepla

- [13] TARABA, B., BEHÚLOVÁ, M., KRAVÁRIKOVÁ, H. *Mechanika tekutín. Termomechanika*. Vydavateľstvo STU v Bratislave, 1999.
- [14] Stefanův–Boltzmannův zákon. *Wikipedia*. [online]. 23.4.2019 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Stefan%C5%AFv%E2%80%93Boltzmann%C5%AFv_z%C3%A1kon
- [15] OptoTech. *OptoTech Innovationen*. [online]. 23.4.2019 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <https://www.optotech.de/innovationen>
- [16] Pieplow & brandt. *Putty materials*. [online]. 23.4.2019 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <http://pieplow-brandt.de/en/produkte/kittmaterialien/>
- [17] Satisloh. *Precision Optics Consumables & Tools*. [online]. 23.4.2019 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: https://satisloh.com/fileadmin/contents/brochures/Consumables/Precision_Optics/ToolsCatalogue_Werkzeugkatalog.pdf
- [18] Dr. Müller DIAMANTMETALL. *Product catalogue diamond and CBN tools for the optical industry*. [online]. 23.4.2019 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: https://home.muedia.de/wp-content/uploads/2018/12/Dr. Mueller_Diamantmetall_Optical-Industry.pdf
- [19] Fizeau interferometer. *Wikipedia*. [online]. 23.4.2019 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Fizeau_interferometer
- [20] KASTRATI, S. *Heat transfer in technological processes*. 23.4.2019 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/20707/Heat_transfer_in_technological_proc..pdf
- [21] JENKINS, F.; WHITE, H. *Fundamentals of Optics (4th ed.)*. McGraw-Hill, 1976. ISBN 0-07-032330-5.